9.19

Spektrum
der Wissenschaft

www.Spektrum.de 9.19

8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

Künstliches Leben

Forscher bauen die ersten komplett synthetischen Organismen

GRAVITATION Ohne Dunkle Materie gelten andere Gesetze

GENTHERAPIE Heilung schon im Mutterleib?

HÖHENSTRÖMUNG Rätselhafte Winde in der Stratosphäre

4 194058 408904 09

Jetzt abonnieren!



SPEKTRUM PSYCHOLOGIE – Das Magazin für den modernen, selbstbestimmten Menschen

Verpassen Sie keine Ausgabe!
Lesen Sie 6 Ausgaben im Jahresabonnement mit einem Preisvorteil von fast 12 % gegenüber dem Einzelkauf!
Print € 31,20; Digital € 24,60; Kombiabo Print + Digital € 37,20
(Printpreise inkl. Versandkosten Inland)

Informationen und Bestellmöglichkeit:

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum-psychologie.de



EDITORIAL
GOTT SPIELEN IM LABOR

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

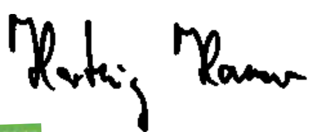
Als der berühmte Physiker Richard Feynman 1988 starb, stand als einer seiner letzten Anschriebe auf seiner großen Wandtafel am California Institute of Technology: »What I cannot create, I do not understand«. Der Genetiker Craig Venter verstand die Aussage offenbar im Sinne von »Ich verstehe etwas erst dann wirklich, wenn ich es selbst nachbauen kann«. Als er 2010 das Genom eines Mycoplasma-Bakteriums komplett durch neu synthetisierte DNA ersetzte, codierte er unter anderem Feynmans Zitat in das Erbgut hinein. Leider verfälschte er dabei das Original zu »What I cannot build, I cannot understand« – ein Fehler, den er später korrigierte.

Manche feierten Venters Meilenstein als Schaffung der ersten synthetischen Lebensform, auch wenn der Genetiker im Grunde nur ein bereits vorhandenes Erbgut mit einigen Veränderungen nachgebaut und in einen verwandten Organismus eingepflanzt hatte. Andere argumentieren dagegen, wahres »künstliches Leben« bedeute nicht weniger als die komplette Neukonstruktion einer funktionierenden Zelle, einschließlich der Stoffwechselwege und Energieproduktion. Damals klang das noch sehr utopisch.

Aber genau daran arbeiten inzwischen viele Wissenschaftler rund um den Globus, darunter mehrere deutsche wie etwa Petra Schwille am Max-Planck-Institut (MPI) für Biochemie in Martinsried bei München, Joachim Spatz am MPI für medizinische Forschung in Heidelberg und Tobias Erb am MPI für terrestrische Mikrobiologie in Marburg. Unser Titelthema ab S. 12 gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in dem spannenden Gebiet der Synthetischen Biologie, das in den letzten Jahren rasant an Fahrt gewonnen hat. Es wurde sogar schon als heißer Kandidat für das nächste Flaggschiff-Projekt der EU mit einer Fördersumme von einer Milliarde Euro gehandelt; allerdings scheint dieses aufwändige Programm nun eingestellt zu werden.

Einen bemerkenswerten Anwendungsfall der Synthetischen Biologie beschreibt der Folgeartikel ab S. 20. Derzeit schreiben einige Forscher das Genom des Bakteriums *Escherichia coli* so um, dass Viren diese Zellen nicht mehr infizieren können. Das wäre ein wichtiger Fortschritt für die Biotech-Industrie, die solche Bakterien in großem Maßstab zur Produktion von Medikamenten und anderen Wirkstoffen einsetzt. Das Ziel ist jetzt in Reichweite; der logisch nächste Schritt ist, auch menschliche Zellen virenresistent zu machen. Das brächte zwar noch ganz andere wissenschaftliche und zudem ethische Probleme mit sich – aber auch die Möglichkeit, dass sich zukünftige Generationen besser vor den gefährlichen Zellpiraten schützen könnten.

Herzlich, Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 3.19 zeigt anhand aktueller Forschungsergebnisse, wie das Immunsystem unsere Gesundheit schützt – manchmal aber auch gefährdet.

IN DIESER AUSGABE


CONNY EHM, FREIBURG

JOACHIM BOLDT

Im Interview auf S. 19 beschreibt der Ethiker, welche schwierigen Fragen es aufwerfen würde, wenn es Forschern gelänge, künstliches Leben zu erzeugen.





LOUIS-ALEXANDRE COUSTON, BENJAMIN FAVIER, MICHAEL LE BARS

Die drei französischen Forscher beschreiben ab S. 42 die chaotischen Mechanismen, welche die starken Winde in der Stratosphäre verursachen. Sie hoffen, deren Auswirkungen auf unser Klima besser verstehen zu lernen.



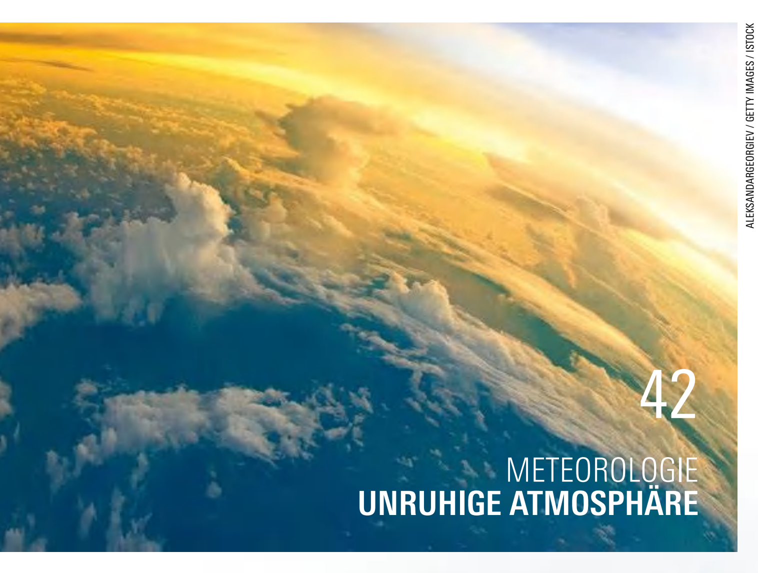
MAI LIN TJOA-BONATZ

Die Geschichte Indonesiens ist das Spezialgebiet der Kunsthistorikerin und Archäologin. Welche Rolle Javas Eliten dem Goldschmuck beimaßen, erläutert sie ab S. 80.

INHALT

TITELBILD:
HENRIK5000 / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

THOMAS LITSCHEL / PETRA SCHWILLE LAB, MPI FÜR BIOCHEMIE



ALEKSANDARGEORGIEV / GETTY IMAGES / ISTOCK



THOMASLENNE / GETTY IMAGES / ISTOCK



MUSEUM WELTKULTUREN FRANKFURT AM MAIN (INV. NR. 19664); MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

VULKANAUSBRUCH VON OBEN

Der Raikoke ist Teil der Kurilen, einer entlegenen Inselkette zwischen Nordjapan und der russischen Halbinsel Kamtschatka, die für ihre vielen Erdbeben und Eruptionen bekannt ist. Im Vergleich zu einigen seiner Nachbarn bricht der Vulkan nur selten aus. Doch in den Morgenstunden des 22. Juni 2019 rumorte es auf der Insel plötzlich, erstmals seit 95 Jahren: Aus dem Krater des Raikoke schoss eine Aschewolke 17 Kilometer in die Höhe und durchstieß dabei die Wolkendecke über dem Pazifik – ein eindrucksvolles Spektakel, das Astronauten auf der Internationalen Raumstation ISS fotografieren konnten.

Bei solch einem plinianischen Vulkanausbruch treibt zunächst die explosionsartige Expansion von heißem Gas die Aschewolke an. Mit zunehmender Höhe nimmt die Dichte der aufsteigenden Säule ab, bis sie den Wert der umliegenden Luft erreicht. Anschließend trägt der Schwung des Auswurfs das schmutzige Material noch etwas höher; gleichzeitig breitet es sich verstärkt horizontal aus.

Beim Ausbruch des Raikoke fegten starke, von einem Sturm angefachte Winde durch die Stratosphäre. Sie bliesen die Asche rasch davon. Am Stamm der pilzförmigen Säule sind zudem weiße Wölkchen aus kondensiertem Wasserdampf zu sehen.

Mitteilung des NASA Earth Observatory, Juni 2019

NASA EARTH OBSERVATORY, JOSHUA STEVENS (UNTER VERWENDUNG VON ISS059-E-119250 DER EARTH SCIENCE AND REMOTE SENSING UNIT, NASA JOHNSON SPACE CENTER)



NASA EARTH OBSERVATORY, JOSHUA STEVENS (UNTER VERWENDUNG VON ISS059-E-119250 DER EARTH SCIENCE AND REMOTE SENSING UNIT, NASA JOHNSON SPACE CENTER)

BIOLOGIE

LANGFINGER IM BERNSTEIN

Um Nahrung zu finden, haben viele Tierarten kreative Strategien entwickelt. Ein neues Beispiel liefert nun ein gerade mal drei Zentimeter großer Bernsteinklumpen aus Myanmar. In ihm ist ein 99 Millionen Jahre altes Vogelbein mit einem überproportional großen Zeh konserviert. Das Tier könnte ihn einst als Greifwerkzeug benutzt und damit Essbares aus Baumstämmen geangelt haben, spekuliert eine Arbeitsgruppe um Lida Xing von der China University of Geosciences.

Ein derart überdimensioniertes Fußglied kannten Zoologen bisher weder von lebenden noch von ausgestorbenen Vögeln. Die Anatomie erinnert allerdings an den langen Mittelfinger der Fingertiere, einer Lemurenart in Madagaskar. Generell sieht man verlängerte Zehen häufig bei Tieren auf Bäumen. Gut möglich also, dass auch der Bernstein-Vogel im Wald lebte.

Das Team um Lida Xing hat den Fund mit einem CT-Gerät untersucht und auf dieser Basis ein 3-D-Modell erstellt. Der Vogel war demnach kleiner als ein Spatz. Sein mittlerer Zeh war 41 Prozent länger als der zweite und 20 Prozent länger als der Tarsometatarsus, eine Verschmelzung aus Mittelfuß- und Fußwurzelknochen. Das konservierte Tier gehört damit zu einer neuen Art, welche die Forscher *Elektorornis chenguangi* tauften. Sie war vermutlich Teil einer Vogelfamilie, die vor 66 Millionen Jahren zusammen mit den Dinosauriern ausgestorben ist.

PNAS 10.1016/j.cub.2019.05.077, 2019



LIDA XING, CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES, BEIJING



ZHONGDA ZHANG; PRESSEBILD ZU XING, L. ET AL.: A NEW ENANTIORNITHINE BIRD WITH UNUSUAL PEDAL PROPORTIONS FOUND IN AMBER. CURRENT BIOLOGY 29, 2019

Ein Bernsteinklumpen hat neben dem 99 Millionen Jahre alten Fuß auch die linke Flügelspitze einer ausgestorbenen Vogelart konserviert (Foto oben). Sie könnte ihren langen Zeh dazu genutzt haben, um Nahrung aus Baumstämmen zu pulen (Illustration unten).

PHYSIK
STÄRKSTER MAGNET DER WELT

Ein Team um David Larbalestier von der Florida State University hat einen neuen Rekord für das stärkste kontinuierliche Magnetfeld aufgestellt: Mit einem Hochtemperatur-Supraleiter habe man eine Feldstärke von 45,5 Tesla (die Maßeinheit der magnetischen Flussdichte) erreicht und könne diese auch über längere Zeit halten, berichten die Physiker. Damit habe man den seit 2000 bestehenden Rekord um ein halbes Tesla überboten.

Der Magnet der Gruppe besteht aus einer zylinderförmigen Spule, um welche die Forscher hauchdünne Bänder aus einer Barium-Kupferoxid-Verbindung gerollt haben. Das Material stammt aus der Klasse der Cuprate, die zum Teil weit über dem absoluten Temperaturnullpunkt ihren elektrischen Widerstand verlieren. Da bewegte elektrische Ladungen ein Magnetfeld erzeugen, kann ein Strom in einem Supraleiter sehr große Feldstärken herbeiführen.

Bei mehr als 30 Tesla verlieren Cuprate für gewöhnlich ihre Supraleitung. Es kommt dann zu einem »Quench«, bei dem der elektrische Widerstand in die Höhe schnellt. Larbalestiers Gruppe kühlte ihren Magneten daher mit flüssigem Helium bis auf knapp über dem Temperaturnullpunkt ab, wo die Supraleitung in der verwendeten Verbindung länger Bestand hat.

Auch das Magnetdesign half beim Erreichen des Rekords: Die Forscher wickelten das Cuprat sehr eng, wodurch sich die Stromdichte im Vergleich zu früheren Versuchen fast verfünffachte. Daneben verzichtete das Team auf die Isolation zwischen einzelnen Lagen. Dadurch konnten Elektronen, wenn sich ein Quench anbahnte, leicht in benachbarte Schichten ausweichen. Um den Rekord aufzustellen, musste das Team den fünf Zentimeter hohen Zylinder noch in die Mitte eines konventionellen Elektromagneten packen, der das Magnetfeld zusätzlich verstärkte.

Nature 10.1038/s41586-019-1293-1, 2019

TECHNIK
ROBOTER ERNTET SALAT

Trotz der zunehmenden Automatisierung der Landwirtschaft sind vielerorts noch Erntehelfer gefragt. Einer der Gründe: Viele Nutzpflanzen – darunter Kiwis, Zitrusfrüchte, Erdbeeren, Brokkoli und Eisbergsalat – lassen sich nur schlecht von Maschinen pflücken. Die Pflanzen sind entweder sehr empfindlich, wachsen auf unebenem Grund oder werden von einem Dickicht aus Blättern verdeckt. Auch fällt es Robotern schwer, reife Früchte bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen eindeutig als solche zu identifizieren.

Zumindest bei Eisbergsalat könnte es bald eine Lösung geben. Das Gewächs wird nach wie vor von Menschen geerntet, die gebückt durch das Feld laufen und die Salatköpfe vorsichtig mit einem Messer abschneiden. Wissenschaftler um Fumiya Iida von der University of Cambridge haben nun jedoch einen Roboter entwickelt, der gesunde und reife Salatköpfe erkennt und diese anschließend vorsichtig abtrennen kann.

Mit Hilfe eines neuronalen Netzes brachte das Forscherteam dem Roboter zunächst bei, Salatköpfe in die Kategorien »reif«, »unreif« oder »von Schädlingen befallen« einzuordnen. Beim anschließenden Feldeinsatz schätzte der »Vegebot« in 91 Prozent der Fälle das Gemüse richtig ein. Um dieses danach am Stamm abzuschneiden und aufzuheben, benutzt er einen Arm, an dessen Ende Greifzangen und ein Messer angebracht sind. Dabei packt der Roboter nur so fest zu, dass er den Salat weder fallen lässt noch zerquetscht. Im Test bekam der Roboter zwar so gut wie alle Köpfe, die er erreichen konnte, auch zu greifen. 38 Prozent beschädigte er dabei allerdings stark. Daneben muss der Vegebot noch effizienter werden: Das aktuelle Modell ist pro Salatkopf etwa eine halbe Minute beschäftigt. Dennoch hoffen die Forscher, dass sich das System auch auf andere Pflanzen trainieren lässt.

Journal of Field Robotics 10.1002/rob.21888, 2019



Erst entscheidet der »Vegebot«, ob ein Salatkopf reif ist – dann pflückt die Maschine ihn behutsam.

UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

RAUMFAHRT
MINI-HELIKOPTER FÜR SATURNMOND

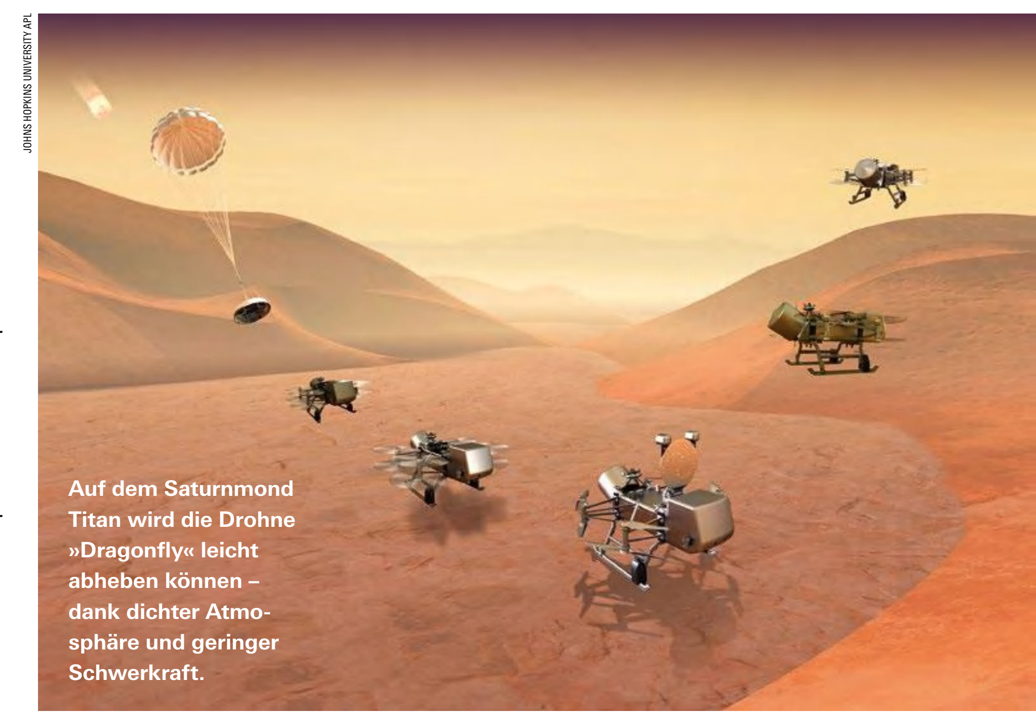
Die US-Raumfahrtbehörde NASA hat eine besondere Mission angekündigt: Eine Raumsonde soll eine kleine Helikopterdrohne auf dem Saturnmond Titan absetzen. Ausgestattet mit acht Rotoren soll »Dragonfly« (englisch für Libelle) knapp drei Jahre lang die Oberfläche des Himmelskörpers erkunden. Der Start von der Erde ist derzeit für 2026, die Ankunft auf Titan für das Jahr 2034 geplant.

Mit einem Durchmesser von 5150 Kilometern ist der Saturnmond größer als Merkur, der innerste Planet im Sonnensystem. Außerdem ist er der einzige bekannte Trabant mit einer ausgeprägten Atmosphäre. Sie besteht vor allem aus Stickstoff und ist deutlich dichter als die irdische Lufthülle. Da die Schwerkraft auf Titan nur einem Fünftel der irdischen Gravitation entspricht, kann der Oktokopter leicht abheben.

Dragonfly soll als Erstes in den Dünenfeldern der Region Shangri-La landen, wo 2005 auch die europäische Landesonde Huygens aufsetzte. Zunächst wird die rund drei Meter lange Drohne nur einige Dutzend Meter weit fliegen, später soll sie Strecken von bis zu acht Kilometern absolvieren. Mit Energie versorgt sie ein so genannter Radioisotopengenerator, der die Zerfallswärme eines Klumpen Plutoniums in Strom umwandelt.

Dragonfly soll nicht nur Bilder von der Oberfläche übertragen, sondern auch die Zusammensetzung des Untergrunds und der Atmosphäre genauer bestimmen. Sie wird ebenso das Wetter auf der fernen Welt beobachten, auf der es Wolken und Seen aus Methan gibt. Mit einem Seismometer kann Dragonfly außerdem möglichen Titanbeben nachspüren.

NASA-Pressemitteilung, Juni 2019


JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APL

Auf dem Saturnmond Titan wird die Drohne »Dragonfly« leicht abheben können – dank dichter Atmosphäre und geringer Schwerkraft.

HIRNFORSCHUNG
EIN NEUER WURMATLAS

Der knapp ein Millimeter lange Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* gilt unter Biologen als eine der am besten untersuchten Tierarten. Von ihm stammt die erste vollständige Karte des Nervensystems eines Lebewesens. Der britische Biologe und spätere Nobelpreisträger Sydney Brenner (1927–2019) hatte hierzu 1986 tausende elektronenmikroskopische Bilder angefertigt und in mühevoller Handarbeit rund 5000 chemische Synapsen identifiziert.

Die damalige Karte bildete allerdings nur das »Konnektom« eines Zwitters ab – bei *C. elegans* gibt es aber auch Männchen. Diese Lücke hat nun eine Arbeitsgruppe um den Genetiker Scott Emmons vom Albert Einstein College of Medicine in New York geschlossen. Die Forscher ergänzten und überarbeiteten die ursprünglichen Aufnahmen mittels moderner Software und kreierten so ein komplettes Konnektom beider Geschlechter.

91 der 385 Neurone des Männchens fanden sie ausschließlich bei diesem; umgekehrt gab es 8 von 302 Neuronen des Zwitters nur in dessen Nervensystem. Die Forscher lokalisierten dabei Verbindungsstellen, die man zuvor übersehen hatte, und schlossen aus der Größe der Synapsen auf deren Stärke. Bei bis zu 30 Prozent der Verknüpfungen gibt es demnach beträchtliche Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Eine mögliche Basis für abweichendes Verhalten?

Emmons und seine Kollegen äußern sich in dieser Frage zurückhaltend: Zwar lasse sich die Funktion einiger Neurone aus ihrer Verschaltung ableiten, etwa aus den Positionen und Strukturen ihrer Synapsen. Dies mit spezifischen Verhaltensweisen einzelner Würmer in Verbindung zu bringen, sei aber sehr schwierig. Außerdem bilde die Struktur des Konnektoms nur einen Teil der Kommunikation im Nervensystem ab, denn auch Botenstoffe wie Neurotransmitter, Neuropeptide und Hormone kontrollieren den Informationsfluss. Auf der jetzt veröffentlichten Karte sind die Botenstoffe jedoch nicht verzeichnet.

Nature 10.1038/s41586-019-1352-7, 2019

UMWELT
SMOG SENKT AUSBEUTE VON SOLARZELLEN

Schmutzige Luft ist nicht nur schlecht für die Gesundheit, sie kann auch zu einem Problem für die Solarenergie werden. Ein Team um Bart Sweerts von der ETH Zürich hat abgeschätzt, wie stark Smog in China die Ausbeute von Fotovoltaikanlagen senkt. Der Einfluss ist offenbar erheblich: Den Forschern zufolge fingen menschengemachte Schwebeteilchen – beispielsweise solche auf Basis von Schwefeldioxid oder Rußpartikeln aus fossilen Verbrennungsprozessen – zwischen 1960 und 2015 ein gutes Zehntel des Sonnenlichts über der Volksrepublik ab, insbesondere über Ballungsgebieten. Das habe sich direkt auf die Solarenergie ausgewirkt: Allein im Jahr 2016 seien dem Land rund 14 Milliarden Kilowattstunden Strom entgangen, schätzt die Gruppe um Sweerts.

Für ihre Studie hatten die Forscher Daten von 119 Messstationen ausgewertet. Demnach sank die durchschnittliche Beleuchtungsstärke in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um 24 Watt pro Quadratmeter. Erst seit dem Inkrafttreten von Luftschutzplänen ist der Trend wieder leicht rückläufig. China ist mittlerweile das Land mit der größten Fotovoltaikleistung, 2030 will es ein Zehntel seines Strombedarfs mit Sonnenenergie decken. Gelänge es bis dahin, die Luftverschmutzung auf das Niveau von 1960 zurückzudrehen, könnte die Ausbeute der dortigen Solaranlagen um 12 bis 13 Prozent steigen, so die Wissenschaftler.

Nature Energy 10.1038/s41560-019-0412-4, 2019

EVOLUTION
DIE ENTSTEHUNG DES DACKELBLICKS

Traurig gucken zu können, bietet offenbar einen Überlebensvorteil, meint ein Forscherteam um Juliane Kaminski von der University of Portsmouth. Das schließen die Forscher jedenfalls aus einem Vergleich der Gesichtsmuskeln von Hunden und Wölfen: Letzteren fehlt der Muskel, mit dem Hunde ihre Augenbrauen anheben können. Die Theorie passt auch gut zu einer früheren Studie der Gruppe, der zufolge Hunde mit »Dackelblick« eher von Menschen als Haustier angenommen werden.

Nun wollten die Forscher wissen, ob sich dieser Gesichtsausdruck im Lauf der mehr als 30000 Jahre langen Domestizierung entwickelt hat. Das scheint der Fall zu sein: Keiner der vier Wölfe, die das Team um Kaminski untersuchte, hatte den Musculus levator anguli oculi medialis. Mit diesem Muskel ziehen Hunde ihre Brauen nach oben und die äußeren Augenwinkel in Richtung der Ohren. Fünf der sechs analysierten Hunderassen besaßen ihn – nur der Siberian Husky, eine besonders ursprüngliche Rasse, kommt ohne aus.

Sich gegenseitig anzuschauen, führt bei sich nahestehenden Menschen – beispielsweise Eltern und ihren Kindern – zu einer Ausschüttung des Bindungshormons Oxytozin. Hunde können eine ähnliche Reaktion auslösen: Ziehen sie ihre Augenbrauen hoch, entsteht ein kindlich trauriger Ausdruck mit großen Augen, der bei Herrchen oder Frauchen ein Gefühl der Fürsorge auslöst. Beim Anblick eines Wolfs bleibt die Oxytozinproduktion dagegen aus. So wählten Menschen wohl – bewusst oder unbewusst – eher Hunde mit starken Gesichtsmuskeln als besten Freund aus, vermutet das Team um Kaminski.

PNAS 10.1073/pnas.1820653116, 2019



Würden Sie diesen Hund im Tierheim lassen?

KATERINA_BRUSNIKA / GETTY IMAGES / ISTOCK

SYNTHETISCHE BIOLOGIE
VON GRUND AUF NEU

Künstlich hergestellte Zellen könnten helfen, die Grenzen des Lebens zu erforschen – und zu überschreiten.

Kendall Powell ist Wissenschaftsjournalistin in Lafayette, Colorado.

spektrum.de/artikel/1661430



THOMAS LITSCHEL / PETRA SCHWILLE LAB, MPI FÜR BIOCHEMIE

Es waren gerade einmal acht Zutaten: zwei Sorten Proteine, zwei Arten von Lipidmolekülen, drei Puffersubstanzen und ein wenig chemische Energie. Doch sie reichten aus, einen Schwarm lebhaft pulsierender Bläschen zu erzeugen, bei denen es sich um rudimentäre zellähnliche Strukturen handelte – ausgestattet mit Mechanismen, um sich selbst zu teilen. Für die Biophysikerin Petra Schwille stellen diese tanzenden Gebilde einen wichtigen Schritt hin zu künstlichen Zellen dar, die aus grundlegenden molekularen Bestandteilen zusammengefügt werden, also nicht von Lebewesen abstammen. Das Ziel, mit einer solchen »Bottom-up«(»von Grund auf«)-Methode ein System herzustellen, das die Merkmale eines lebenden Organismus aufweist, verfolgt Schwille seit gut zehn Jahren – aktuell am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried.

»Mich hat immer schon die Frage fasziniert, was lebende von nichtlebender Materie unterscheidet«, erzählt die Biophysikerin. Die Herausforderung bestehe für sie darin, zu ermitteln, welche Bestandteile für lebende Systeme wirklich unverzichtbar sind. Sie stellt sich so etwas wie eine perfekte synthetische Zelle vor, in der sämtliche Faktoren bekannt sind, die dem Gebilde »Lebenskraft« verleihen.

Wissenschaftler versuchen bereits seit mehr als 20 Jahren, künstliche Zellen zu erzeugen, indem sie Biomoleküle so zusammenfügen, dass die dabei entstehenden Systeme verschiedene Aspekte des Lebens abbilden. Es gibt zwar viele Merkmale, die lebende Strukturen auszeichnen, generell lassen sie sich aber in drei Kategorien einordnen: Kompartimentierung, also räumliche Trennung von Biomolekülen; Metabolismus, sprich biochemischer Stoffumsatz; und Informationsverarbeitung.

Die einschlägigen Forschungsarbeiten nehmen immer mehr an Fahrt auf, was unter anderem daran liegt, dass so genannte Mikrofluidik-Anwendungen große Fortschritte machen. Dazu gehören beispielsweise Chiplabore, bei denen flüssigkeitsgefüllte Reaktions- und Analysekammern, Strömungskanäle, Mikropumpen, -ventile und Sensoren auf einem kreditkartengroßen Chip untergebracht sind. Diese Techniken erlauben es den Wissenschaftlern, einzelne Zellen zu analysieren und die Bewegungen von Zellbestandteilen zu beeinflussen. Forschergruppen ist es bereits gelungen, zellähnliche Bläschen in bestimmte Formen zu bringen, einen rudimentären Stoffwechsel in Gang zu setzen und im Labor hergestellte Genome in lebende Zellen einzuschleusen. All dies miteinander zu kombinieren, bleibt freilich eine Herausforderung.

Mit nur wenigen Zutaten haben Forscher »tanzende« Lipidbläschen erzeugt, die periodisch zwischen verschiedenen Formen wechseln (Computergrafik).

THOMAS LITSCHEL / PETRA SCHWILLE LAB, MPI FÜR BIOCHEMIE

AUF EINEN BLICK
DER WEG ZUM KÜNSTLICHEN LEBEN

1. Forscher versuchen künstliche Organismen herzustellen, indem sie Biomoleküle so zusammenfügen, dass die dabei entstehenden Systeme verschiedene Eigenschaften lebender Zellen annehmen.

2. In Versuchen mit Lipidbläschen, so genannten Liposomen, gelang es bereits, rudimentäre Zellorganellen zu erschaffen, die einige Schritte des Energiestoffwechsels oder der Fotosynthese ausführen.

3. Durch Einbringen eines künstlichen Genoms in ein künstliches Liposom möchten die Wissenschaftler einen vollständig synthetischen Organismus erzeugen. Offen ist die Frage, ob dieser evolvieren würde.

Im September 2017 haben Wissenschaftler aus 17 niederländischen Laboren die gemeinsame Forschungsplattform BaSyC (»Building a Synthetic Cell«, deutsch: eine künstliche Zelle bauen) gegründet. Deren Ziel lautet, binnen zehn Jahren ein zellähnliches System herzustellen, das zu Wachstum und Teilung fähig ist, wie die Biophysikerin Marileen Dogterom erläutert, die dem Vorstand von BaSyC angehört und eine Arbeitsgruppe an der Technischen Universität Delft leitet. Die niederländische Regierung unterstützt das Projekt über ihr »Gravitation«-Programm mit 18,8 Millionen Euro.

Im September 2018 gab die US-Behörde National Science Foundation ihr erstes Programm für synthetische Zellen bekannt, gefördert mit zehn Millionen US-Dollar. Und mehrere europäische Forscher, darunter Schwille, haben die Schaffung solcher Strukturen als mögliches Flaggschiff-Projekt der EU vorgeschlagen, was eine Förderung von einer Milliarde Euro zur Folge hätte; allerdings wird die EU ihr Flaggschiff-Programm wohl nicht fortsetzen, wie die Fachzeitschrift »Science« berichtete. Vertreter der Synthetischen Biologie halten es für möglich, dass die ersten vollständig künstlichen Zellen in rund zehn Jahren das Licht der Welt erblicken. »Ich bin mir ziemlich sicher, dass wir das schaffen werden«, meint Schwille.

Schon jetzt können Forscher auf wichtige Erfolge verweisen, wenn es darum geht, einzelne Aspekte zellulären Lebens nachzubilden. Das gilt besonders hinsichtlich der Lipidmembranen, die biologische Zellen umgeben und deren Inneres kompartimentieren, also in separate Reaktionsräume unterteilen. Membranen sind unverzichtbar dafür, Moleküle so zu organisieren, dass sie zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zusammenwirken. Würde man beispielsweise die Zellmembranen von Bakterien auflösen und den Inhalt der Mikroben in ein Reagenzglas schütten, kämen die lebenserhaltenden Prozesse darin schon bald zum Erliegen. Denn in einer funktionierenden Zelle müssen bestimmte Komponenten getrennt voneinander bleiben, andere hingegen selektiv zusammenkommen.

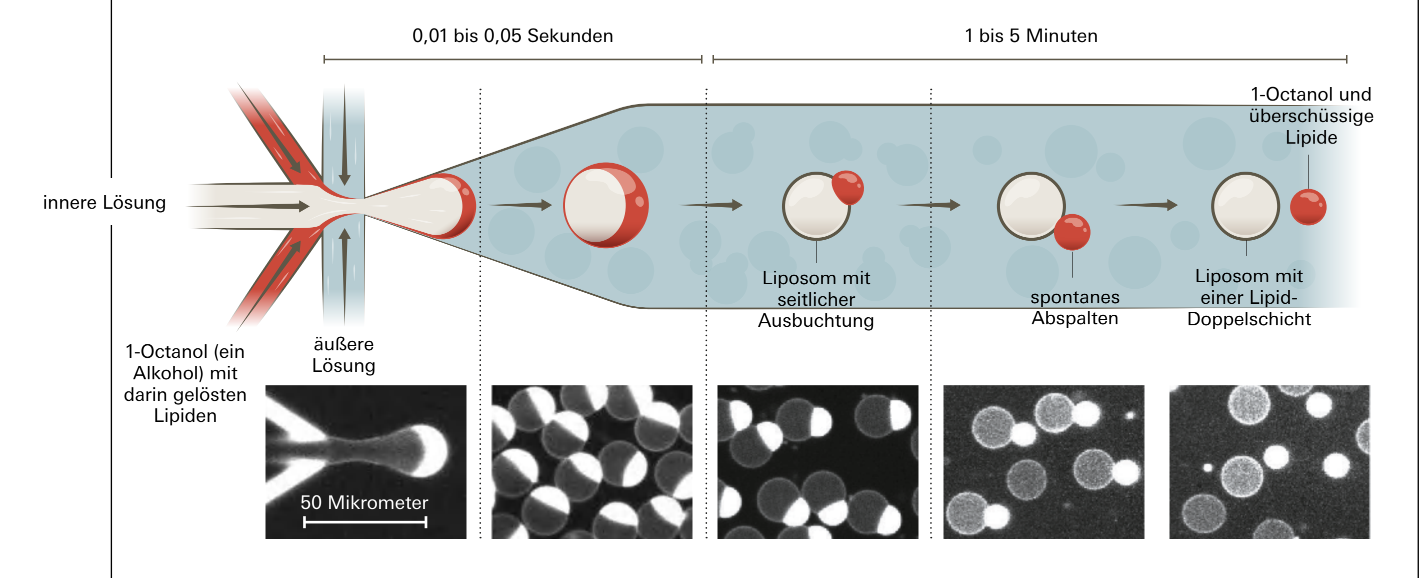
Lipidmembranen als Dreh- und Angelpunkt

Meist wird das dadurch erreicht, dass Biomoleküle an Membranen gebunden oder von diesen umschlossen sind. Schwille und ihre Kollegen haben viel Expertise darin, solche Systeme nachzubilden. Vor etwa zehn Jahren begannen sie damit, Min-Proteine, die eine Rolle bei der bakteriellen Zellteilung spielen, zu künstlichen Lipidmembranen hinzuzugeben. Wie die Wissenschaftler feststellten, brachten die Eiweiße die Membranen dazu, sich wellenähnlich zu verformen. Fügte das Team die Proteine zu dreidimensionalen Lipidkugeln hinzu, platzten diese wie Seifenblasen.

Schwilles Gruppe und andere Forscher gingen dazu über, mit Hilfe der Mikrofluidik-Technik so genannte Liposomen herzustellen – zellgroße Bläschen mit einer Membran aus Lipidmolekülen, die einen wassergefüllten Hohlraum

Die Bläschen-Maschinen

Mit Hilfe von Mikrofluidik-Chips stellen Forscher kleine Bläschen aus Lipidmolekülen her, so genannte Liposomen, die den Membranen von Zellen ähneln. Solche Strukturen lassen sich etwa mit einem Chip produzieren, auf dem sechs Kanälchen zusammenlaufen. An deren Verbindungsstelle strömen drei verschiedene Lösungen so ineinander, dass Flüssigkeitströpfchen von einem Alkohol-Lipid-Gemisch umgeben und dann abgeschnürt werden. Mit der Zeit entsteht um die Tröpfchen herum eine Lipid-Doppelschicht, während sich die überschüssigen Lipidmoleküle sowie der Alkohol an einer Stelle sammeln und schließlich spontan abspalten. Zurück bleibt ein vollständig ausgebildetes Liposom.



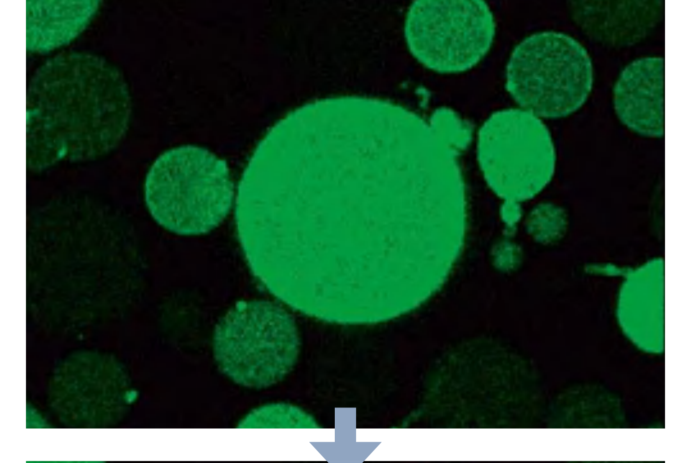
NATURE, NACH DESHPANDE, S. ET AL.: OCTANOL-ASSISTED LIPOSOME ASSEMBLY ON CHIP. NATURE COMMUNICATIONS 7, ART. 10447, 2016, FIG. 1; POWELL, K.: HOW BIOLOGISTS ARE CREATING LIFE-LIKE CELLS FROM SCRATCH. NATURE 563, 2018

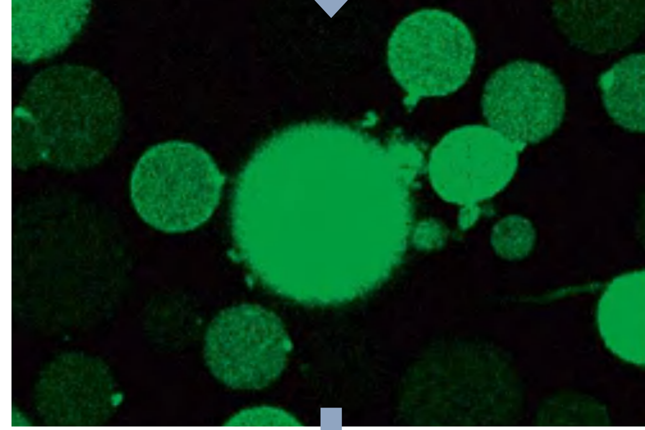
umgibt. In diese Liposomen lassen sich viele Proteine einbauen, egal ob direkt in die Lipidmembran hinein oder in den Innenraum.

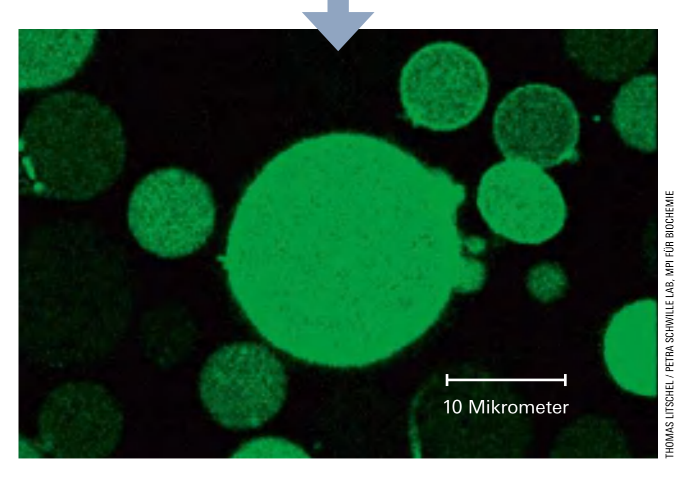
Thomas Litschel, ein Mitarbeiter Schwilles, und seine Kollegen lösten dazu Min-Proteine in Wasser und gaben Tröpfchen dieser Mixtur in ein schnell rotierendes Reaktionsgefäß. Dort wurden die Tröpfchen von der Zentrifugalkraft durch Schichten aus Lipidmolekülen hindurchgepresst und dabei von diesen umschlossen. Am anderen Ende des Gefäßes kamen sie als Liposomen mit einem Durchmesser von 10 bis 20 Mikrometern (millionstel Metern) wieder heraus, das entspricht etwa der Größe einer pflanzlichen oder tierischen Zelle. Konkret handelte es sich dabei um einen Liposomentyp namens »große unilamellare Vesikel«, abgekürzt GUV. Diese sind von einer Lipid-Doppelschicht umgeben, in der sich die Moleküle so orientieren, dass ihre Wasser meidenden (»hydrophoben«) Bereiche ins Innere der Membran ragen und einander zugewandt sind, während ihre Wasser liebenden (»hydrophilen«) Teile an den Membranoberflächen sitzen. GUV lassen sich auf verschiedene Weise erzeugen; jene von Litschel und seinem Team reagierten deutlich auf die Zugabe von Min-Proteinen: Sie pulsierten, tanzten hin und her und zogen sich in der Mitte zusammen.

Die Wissenschaftler um Schwille haben herausgefunden, dass Min-Proteine sich selbst organisieren und Muster in der Lipidmembran erzeugen. »Wir verstehen diese Moleküle recht gut und möchten ihr Verhalten in diversen experimentellen Umgebungen testen«, sagt die Biophysikerin. Vielleicht lassen sich die Eiweiße nutzen, um Liposomen zur Teilung anzuregen oder um bestimmte Moleküle an einzelnen Stellen solcher synthetischen Zellen anzusammeln – darauf weisen jedenfalls Litschels Versuchsergebnisse hin. Schwille hofft, dass die Biomoleküle es ihr ermöglichen, zellähnliche Strukturen auf diverse Arten zu manipulieren.

Auch Cees Dekker, Biophysiker an der Technischen Universität Delft, und sein Team haben Liposomen mit ausgewählten Proteinen beladen, wobei sie spezielle Mikrofluidik-Chips einsetzten (siehe »Die Bläschen-Maschinen«, links). Auf einem solchen Chip laufen sechs winzige Kanäle zusammen; zwei davon transportieren Lipidmoleküle, einer befördert die für das Innere der Bläschen vorgesehene Flüssigkeit (die »Innenlösung«), zwei weitere leiten die gewünschte Außenlösung und der sechste dient dem Abfluss. An der Verbindungsstelle dieser Röhrchen bilden sich Liposomen, die so groß wie eine Zelle sind und mit diversen Biomolekülen bestückt sein können – entweder eingebettet in die Lipidmembran oder frei schwimmend im Innern des Bläschens.







THOMAS LITSCHEL / PETRA SCHWILLE LAB, MPI FÜR BIOCHEMIE

Min-Proteine bringen künstliche Liposomen zum Pulsieren. Unter dem Mikroskop sieht das so aus, als würde das Liposom (grün) abwechselnd kleiner und größer werden.

Erzwungene Teilung

Dekkers Team hat zudem mit verschiedenen Druck- und Verformungstechniken experimentiert, um die Liposomen ihrer kugelförmigen Gestalt zu berauben und ihnen eine Form zu verleihen, die mehr der von natürlichen Zellen gleicht. Mikrofludik-Chips mit ihren kapillarähnlichen Mikrokanälen erlauben solche Manipulationen, ebenso wie sich mit ihnen Liposomen bewegen und sortieren lassen. 2018 entwickelte das Team einen Chip, der die Bläschen mechanisch teilt, indem er sie gegen ein scharfkantiges Hindernis drückt. »Das ist natürlich nur ein Teilerfolg – viel interessanter wäre es, eine Teilung der Liposomen von innen heraus zu erreichen; dennoch liefert diese Methode uns wichtige Informationen«, erläutert Dekker. Dazu gehört beispielsweise die Erkenntnis, welche Kräfte für eine solche Teilung erforderlich sind und welche physischen Manipulationen Liposomen noch tolerieren.

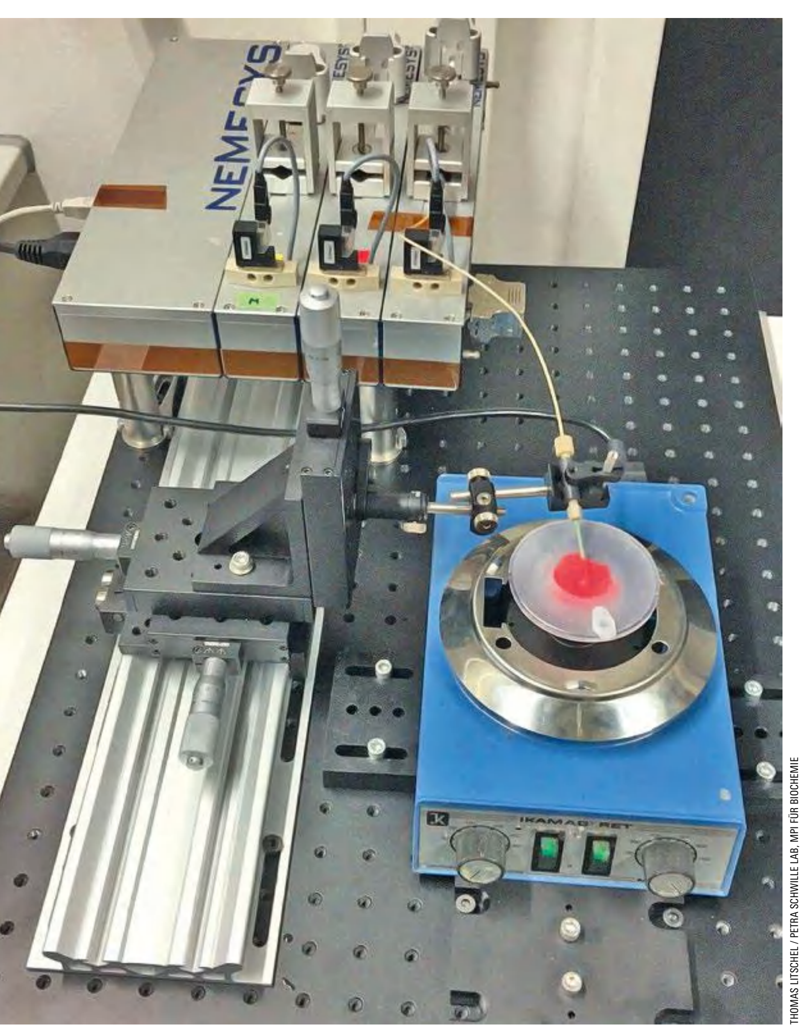
Aufschlussreich waren auch Verformungsexperimente, die Dekker und seine Kollegen mit lebenden *Escherichia-coli*-Zellen anstellten. Sie ließen die Bakterien in mikrometergroßen Silikonkammern wachsen und verliehen ihnen so ein vergrößertes oder auch kubisches Äußeres. Das erlaubt

Rückschlüsse darauf, wie die Zellgestalt den Teilungsmechanismus beeinflusst. Auch lässt sich damit untersuchen, wie Min-Proteine in Zellen unterschiedlicher Abmessung und Form funktionieren.

Seit es möglich ist, Liposomen mit molekularen Komponenten zu beladen, ohne sie dadurch zum Platzen zu bringen, können die Forscher analysieren, wie sich Moleküle in einem zellähnlichen System zur Zusammenarbeit bewegen lassen. Lebende Strukturen benötigen Energie – bei natürlichen Organismen normalerweise in Form der Verbindung Adenosintriphosphat (ATP). Zwar lässt sich ein solcher Energieträger von außen zuführen, doch viele Synthetische Biologen sind der Ansicht, dass eine echte künstliche Zelle ihr eigenes »Kraftwerk« haben sollte – also eine Struktur, die sich mit den Mitochondrien in tierischen Zellen oder den Chloroplasten in pflanzlichen Zellen vergleichen lässt; beide stellen ATP her.

Eine Gruppe um Joachim Spatz vom Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg hat ein rudimentäres Mitochondrium erzeugt, das ATP im Innern eines Vesikels produziert. Hierbei nutzten die Wissenschaftler wieder die Vorteile der neuen Mikrofluidik-Techniken. Zunächst stabilisierten sie Liposomen des Typs GUV mit Hilfe von Polymerschichten. Dann schickten sie die Bläschen durch einen Mikrokanal und gaben dort große Proteine hinzu, entweder in den Innenraum des Liposoms oder in dessen Lipidmembran hinein (»Protozellen vom Fließband«, rechts).

Hier befördern Spritzenpumpen (hinten links) die gewünschte Innenflüssigkeit von Liposomen in ein schnell rotierendes Gefäß (vorne rechts). Dieses presst die Flüssigkeit durch Öl und bringt so die Liposomen hervor.



THOMAS LITSCHEL / PETRA SCHWILLE LAB, MPI FÜR BIOCHEMIE

Spatz und seine Kollegen beluden die Membranen mit einem Enzym namens ATP-Synthase, das ATP erzeugt und dabei von Protonen angetrieben wird, die entlang eines Konzentrationsgefälles fließen. Indem die Wissenschaftler Säuren zur Außenlösung hinzugaben und so den pH-Wert außerhalb der Liposomen senkten, trieben sie die ATP-Produktion im Innern der Bläschen an. Wie Spatz berichtet, lassen sich die Liposomen zwecks weiterer Proteininjektionen erneut in den Mikrokanal einschleusen. So könne man beispielsweise ein zusätzliches Enzym in die Bläschen einbauen, das den Protonengradienten aufrechterhält, welcher die ATP-Synthase antreibt. »Damit kämen wir einem lebenden System einen wichtigen Schritt näher.«

Wissenschaftler um den Biochemiker Tobias Erb vom Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg verfolgen einen alternativen Ansatz, um zelluläre Stoffwechselreaktionen nachzustellen. Sie interessieren sich dafür, wie fotosynthetisch aktive Mikroorganismen Kohlenstoffdioxid aus der Umgebung herausfiltern und in Zucker und andere organische Verbindungen umwandeln. Bei ihren Experimenten setzen sie quasi bei null an und versuchen, einen entsprechenden Stoffwechsel von Grund auf zu konstruieren. »Wie nehmen die Perspektive von Ingenieuren ein und überlegen uns zuerst, wie wir etwas gestalten wollen, bevor wir es in die Realität umsetzen«, sagt Erb.

Fotosynthese im Labor: Besser als ihr natürliches Vorbild?

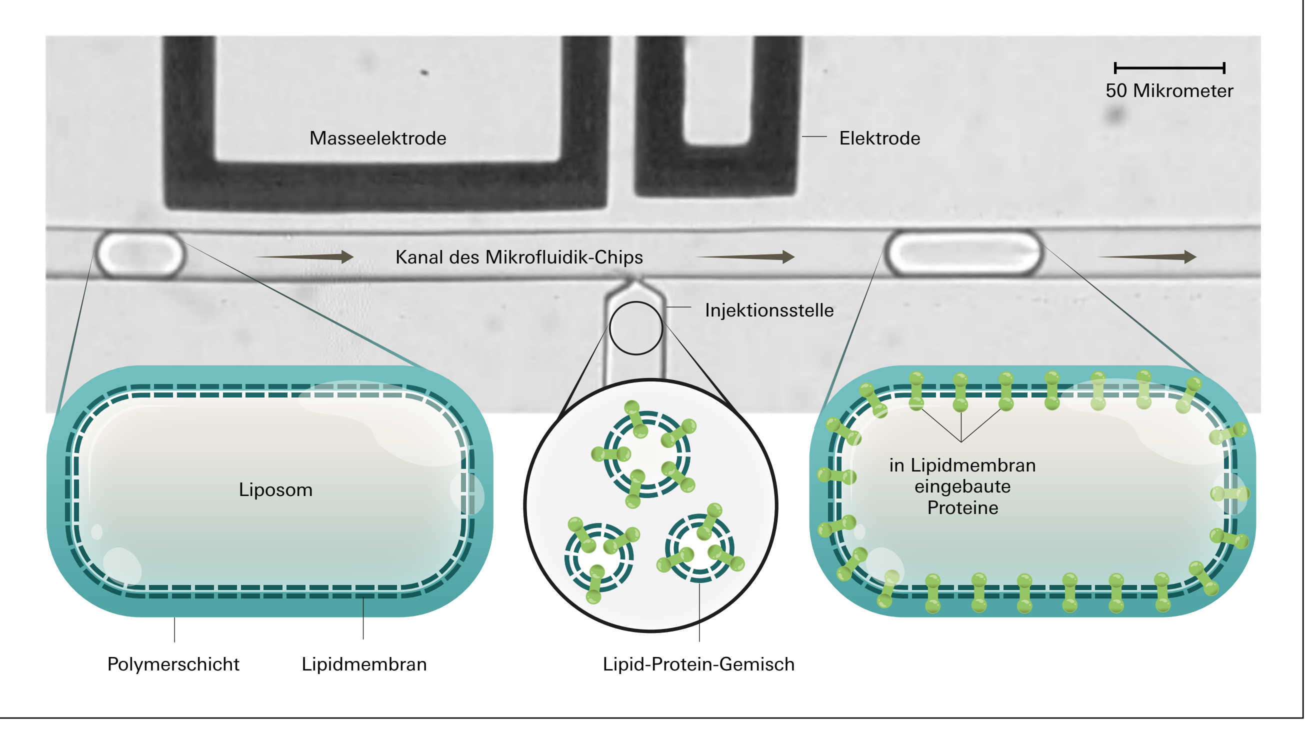
Der Biochemiker und seine Mitarbeiter haben ein System entworfen, das Kohlenstoffdioxid in Malat umsetzt, ein wichtiges Stoffwechselzwischenprodukt der Fotosynthese. Dabei hatten sie den Anspruch, dass der synthetische Metabolismus effizienter funktionieren sollte als sein Gegenstück in natürlichen Zellen. Die Forscher durchsuchten Datenbanken nach Enzymen, die die jeweiligen Einzelreaktionen katalysieren. Einige davon optimierten sie mit biotechnologischen Verfahren. Letztlich wählten sie 17 Enzyme aus neun unterschiedlichen Organismen aus, etwa aus *Escherichia coli*, der Ackerschmalwand *(Arabidopsis thaliana)*, einem Archaeon und aus menschlichen Zellen. Das Stoffwechselsystem, das sie daraus zusammenstellten, erwies sich allerdings als ineffizient und langsam.

»Wir hatten Enzyme zusammengepackt, die nicht gut miteinander harmonieren«, resümiert Erb. Doch nachdem das Team weitere Anstrengungen unternommen hatte, die Proteine zu optimieren, landete es irgendwann bei der verbesserten »Version 5.4« des künstlichen Systems, die um 20 Prozent effizienter funktioniert als der natürliche Mechanismus.

Die Arbeiten gehen weiter, und Erb und seine Mitarbeiter haben damit begonnen, einen rudimentären künstlichen

Protozellen vom Fließband

Winzige Injektionssysteme erlauben es den Wissenschaftlern, Liposomen mit Eiweißen zu bestücken. Zunächst werden die Lipidbläschen mit einer Polymerschicht stabilisiert und dann durch den Kanal eines Mikrofluidik-Chips gepresst. Sobald sie die Injektionsstelle passieren, erhalten sie einen elektrischen Impuls und nehmen infolgedessen Proteine auf, die seitlich zuströmen. Je nach Versuchsbedingungen gelangen die Eiweiße dabei entweder ins Innere der Liposomen oder setzen sich in deren Lipidmembran.



NATURE, NACH WEISS, M. ET AL.: SEQUENTIAL BOTTOM-UP ASSEMBLY OF MECHANICALLY STABILIZED SYNTHETIC CELLS BY MICROFLUIDICS. NATURE MATERIALS 17, 2018, FIG. 2; POWELL, K.: HOW BIOLOGISTS ARE CREATING LIFE-LIKE CELLS FROM SCRATCH. NATURE 563, 2018

Chloroplasten zu erzeugen. Sie zermahlen Spinat in einem Mixgerät und fügen die dabei gewonnene Fotosynthese-Maschinerie ihrem Enzymsystem hinzu. Es entsteht ein molekularer Apparat, der ATP synthetisiert und CO_2 in Malat umwandelt, sobald er mit UV-Licht bestrahlt wird.

In Reaktionsgefäßen, wie die Forscher sie bislang nutzen, mag das alles eine Zeit lang gut gehen, sagt Erb, doch das Ziel sei letztlich, dass die einzelnen Reaktionsschritte in einer von Lipidmembranen kompartimentierten Umgebung ablaufen – etwa wie im Chloroplasten einer Pflanze. Um dieses Ziel zu erreichen, arbeitet er mit Kollegen wie Kate Adamala zusammen, die sich mit komplexen Reaktionsräumen befassen. Adamala und ihre Mitarbeiter an der University of Minnesota in Minneapolis versuchen, programmierbare Bioreaktoren zu konstruieren. Hierfür schleusen sie genetisches Material in Liposomen ein und verschmelzen diese dann, um kompliziertere Gebilde hervorzubringen, die bestimmte Proteine herstellen. Dabei nutzen sie einmal mehr die neuen Mikrofluidik-Techniken, erzeugen aber kleinere Liposomen. Denen fügen sie ringförmige DNA-Moleküle (»Plasmide«) mit den jeweils gewünschten Genen hinzu sowie den zellulären Apparat, der daraus Proteine macht. Mit diesem Ansatz haben sie beispielsweise mikroskopische Bioreaktoren entwickelt, die antibiotische Substanzen in ihrer Umgebung registrieren und darauf mit einem Biolumineszenz-Signal reagieren.

Indem sie einfache Bioreaktoren miteinander fusionieren, stellen die Forscher um Adamala auch komplexere Systeme her. Allerdings beginnen diese zu versagen, sobald sie aus etwa zehn oder mehr Komponenten hervorgegangen sind, was die Wissenschaftler vor große Probleme stellt. In einer natürlichen Zelle werden Proteine, die sich in ihren Aktivitäten gegenseitig beeinflussen können, mittels verschiedener Mechanismen voneinander getrennt gehalten. Bei den viel einfacher aufgebauten synthetischen Strukturen müssen die Biologen andere Lösungen dafür finden. Beispielsweise könnte der Experimentator vorgeben, welche Liposomen miteinander fusionieren und wann. Eine andere Möglichkeit sind chemische Markierungen (»Tags«), die das Verschmelzen der Liposomen steuern.

In jedem Fall benötigt eine eigenständige synthetische Zelle eine »Betriebssoftware«: Damit sie die vorgesehenen Funktionen erfüllen und sich selbst vervielfältigen kann, muss sie Informationen speichern und wieder abrufen können. In natürlichen Organismen geschieht dies mit Hilfe von Genen auf Nukleinsäuren, wobei deren Anzahl von einigen Hundert bei Mikroorganismen bis hin zu Zehntausenden etwa beim Menschen reicht. Wie viele Gene eine synthetische Zelle braucht, um selbstständig existieren zu können, ist sehr umstritten. Schwille und andere gehen von einigen Dutzend aus, während Adamala zu jenen gehört, die eher 200 bis 300 für wahrscheinlich halten.

Es gibt verschiedene Methoden, sich dieser Zahl zu nähern. Einige Wissenschaftler haben einen Top-down-Ansatz gewählt und versucht, einen lebenden Organismus nach und nach auf seine Kernbestandteile zu reduzieren. Der Biologe John Glass und seine Kollegen am J. Craig Venter Institute (JCVI) in La Jolla, Kalifornien, arbeiteten mit einem der kleinsten bekannten mikrobiellen Genome der Welt, nämlich dem Erbgut des Bakteriums *Mycoplasma mycoides*. Die Forscher schalteten darin systematisch ein Gen nach dem anderen aus, um herauszufinden, welche wirklich wichtig sind. Anschließend stellten sie im Labor ein Minimalgenom her, das sich nur noch aus den erwiesenermaßen essenziellen Erbanlagen zusammensetzte. Es enthielt 473 Gene – etwa halb so viele wie das Erbgut des ursprünglichen Bakteriums –, und die Forscher schleusten es in die verwandte Bakterienart *Mycoplasma capricolum* ein. Im Jahr 2016 demonstrierte das Team, dass dieser synthetische Organismus frei leben kann, wenngleich er sich nur langsam vermehrt. Laut Glass dürfte es schwierig sein, die Zahl seiner Gene noch stärker zu drücken: Nehme man weitere Erbanlagen weg, töte das den Organismus entweder oder verringere zumindest seine Teilungsaktivität auf nahezu null.

Von rund 100 Genen ist nicht bekannt, warum die Zelle sie zum Überleben braucht

Glass und seine Kollegen am JCVI haben eine Liste unbedingt notwendiger »zellulärer Aufgaben« erstellt, wobei sie sich auf die am weitesten entwickelte Version ihres Minimalgenoms namens JCVI-syn3.0a stützten. Dieser Katalog gibt Auskunft darüber, welche Funktionen eine Zelle mindestens erfüllen muss, damit sie eigenständig existieren kann. Von etwa 100 Erbfaktoren in ihrem Minimalgenom wissen die Forscher allerdings nicht, warum sie überlebenswichtig sind.

Im nächsten Schritt wollen Glass und Adamala das JCVI-syn3.0a-Genom in ein künstlich hergestelltes Liposom einbringen, das die nötige Maschinerie besitzt, um DNA in Proteine umzuschreiben. Dabei wird sich zeigen, ob das entstehende Gebilde überlebensfähig ist. Falls ja, würde es sich um einen Organismus handeln, bei dem sowohl die Soft- als auch die Hardware synthetisch sind. Könnte er wachsen und sich vermehren, stellte das einen gewaltigen Schritt dar. Und dennoch wäre nach Ansicht vieler Wissenschaftler das Ziel noch nicht erreicht. Denn um einem Lebewesen wirklich nahezukommen, müsste er sich auch von selbst weiterentwickeln und an seine Umwelt anpassen, meinen sie. »Wenn sich etwas selbst reproduziert, ist es noch nicht notwendigerweise Leben«, sagt Schwille. »Um als solches zu gelten, muss es neue Funktionen entwickeln.«

Glass und seine Mitarbeiter haben mit dem JCVI-syn3.0a-Genom bereits Evolutionsexperimente in einer Laborumgebung durchgeführt. Dabei selektierten sie auf die Fähigkeit, in nährstoffreichen Lösungen schneller zu wachsen. Nach etwa 400 Generationen entstanden Gebilde, die sich um rund 15 Prozent rascher teilten als die ursprünglichen Strukturen und einige Veränderungen in der Gensequenz aufwiesen. Doch das Experiment lieferte noch keinen Hinweis darauf, dass die synthetischen Mikroben neue zelluläre Funktionen hervorgebracht oder ihre reproduktive Fitness sprunghaft gesteigert hätten.

Tobias Erb meint, erst die Herausforderung, künstlichen Zellen Evolution »einzuhauchen«, mache die Sache wirklich interessant. Es sei dieses kleine bisschen Unordnung in biologischen Systemen, das es ihnen ermögliche, ihre Leistungsfähigkeit zu steigern. »Als Ingenieure sollten wir nicht anstreben, eine perfekte synthetische Zelle herzustellen. Wir sollten ein sich selbst korrigierendes System entwickeln, das mit der Zeit besser wird.«

Derlei Strukturen könnten Erkenntnisse darüber liefern, wie Leben auf anderen Planeten möglicherweise beschaffen ist. Künstliche zelluläre Bioreaktoren wiederum könnten neue Möglichkeiten eröffnen, Krebserkrankungen zu behandeln, Antibiotikaresistenzen zu bekämpfen oder Umweltverschmutzungen zu beseitigen. Ein solches System im menschlichen Körper oder in der Umwelt freizusetzen, wäre freilich mit Risiken verbunden.

Ohnehin werfen synthetische Zellen, die Eigenschaften von Lebewesen haben, zahlreiche philosophische Fragen auf (siehe hierzu das Interview »Die Übergänge sind fließend«, rechts). Handelt es sich tatsächlich um Leben? Wenn ja, ist es selbstständig existenzfähig? Können wir es kontrollieren? Das sind Fragen, die öffentlich diskutiert werden sollten, davon zeigt sich jedenfalls Marileen Dogterom überzeugt. Dass künstliche Zellen quasi Amok laufen könnten, befürchtet sie allerdings nicht. »Ich bin sicher, dass unsere ersten Kreationen nur ein müder Abklatsch dessen sein werden, was in der Biosphäre bereits existiert.« Zudem ließen sich in solche Gebilde mit einfachen Mitteln diverse Kontrollmechanismen oder Ausschalter für den Notfall einbauen, die die Zellen bei Bedarf unschädlich machen würden.

Dogterom und andere Synthetische Biologen werden auf jeden Fall weiter daran arbeiten, die Grenzbereiche des Lebens zu erforschen – und zu überschreiten. »Wir haben die Genome und die Liste der weiteren Zutaten dafür«, sagt die Biophysikerin. »Die Zeit ist reif.« ◂

QUELLEN

Deshpande, S. et al.: Octanol-assisted liposome assembly on chip. Nature Communications 7, 2016

Hutchinson, C.A. et al.: Design and synthesis of a minimal bacterial genome. Science 351, 2016

Litschel, T. et al.: Beating vesicles: encapsulated protein oscillations cause dynamic membrane deformations. Angewandte Chemie International Edition English 57, 2018

Schwander, T. et al.: A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. Science 354, 2016

Weiss, M. et al.: Sequential bottom-up assembly of mechanically stabilized synthetic cells by microfluidics. Nature Materials 17, 2018

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 563, S. 172–175, 2018

ETHIK

»DIE ÜBERGÄNGE SIND FLIESSEND«


CONNY EHM, FREIBURG

Der Ethiker Joachim Boldt über künstliche Lebewesen, Patentierungen und Enhancement.

Joachim Boldt ist stellvertretender Direktor am Institut für Ethik und Geschichte der Medizin an der Universität Freiburg. Er hat unter anderem als Sachverständiger für den Ethikbeirat des Deutschen Bundestags sowie für den nationalen Ethikrat Dänemarks gearbeitet.

Die Bottom-up-Biologie möchte aus Biomolekülen künstliche Strukturen erschaffen, die Merkmale von Lebewesen aufweisen. Ab wann lassen sich solche Strukturen als echtes Leben ansehen?
Eine konkrete Schwelle gibt es wohl nicht, weil die Übergänge fließend sind und wir keine punktgenaue Definition davon haben, was Leben ist. Selbst aus der Natur kennen wir Übergangsformen wie die Viren. Doch wenn es gelänge, Strukturen zu entwickeln, die alle wichtigen Kriterien des Lebens erfüllen – Stoffwechsel, Evolutionsfähigkeit und so weiter –, dann müsste man wohl von Leben sprechen.

Welche Merkmale muss ein System unbedingt haben, um als lebend zu gelten?
Hierzu existiert kein echter Konsens. Aus meiner Sicht ist ganz entscheidend, dass ein solches System sich gegenüber einer Umwelt selbst erhält und organisiert, wobei es von dieser Umwelt abgrenzbar ist und zugleich mit ihr in Stoffaustausch steht.

Wären künstliche Lebewesen Erfindungen?
Ich würde eher von einer Zwischenkategorie zwischen Erfindung und Entdeckung sprechen. Einerseits wären sie konstruiert, andererseits handelte es sich um eigenständig existenzfähige Gebilde, über die wir keine vollständige Verfügungsgewalt hätten, zumal wenn sie evolvieren. Sie als Entdeckung einzuordnen, unterstellt quasi, man müsse keine Verantwortung für ihre Folgewirkungen übernehmen. Spricht man von Erfindungen, dann ignoriert das zu einem gewissen Grad ihre Selbstorganisationsfähigkeiten. Wir brauchen etwas dazwischen.

Inwiefern sollten künstliche Lebewesen patentierbar sein?
Erfindungen sind patentierbar, Entdeckungen sind es nicht, so die juristische Festlegung. Wenn wir synthetische Organismen als etwas ansehen, was dazwischenliegt, brauchen wir auch patentrechtlich neue Regelungen für sie. Die könnten vielleicht so aussehen, dass einige Teile oder Eigenschaften dieser Systeme patentierbar wären, andere aber nicht – oder dass ein Patentschutz nur in bestimmten Anwendungsbereichen gälte.

Forscher wollen den genetischen Code von Zellen grundlegend neu strukturieren – mit dem Ziel, virusresistente Zellen zu erschaffen. Wie ist das aus ethischer Sicht zu bewerten?
Das geht in Richtung Enhancement, also Verbesserung von Lebewesen durch gentechnische Eingriffe, und wäre ethisch vor allem dann relevant, wenn es Menschen beträfe. Denn es gibt ja durchaus Überlegungen, auch menschliche Zellen so zu verändern. Im Bereich des Enhancement lautet die wichtigste Frage, ob die immer vorhandenen Nebenwirkungen den Nutzen wert sind. Zumal es gar nicht so leicht ist zu sagen, was denn »besser« genau heißen soll. Noch problematischer wird es bei einem Enhancement von Keimbahnzellen, bei dem nicht nur das jeweils behandelte Individuum betroffen ist, sondern auch seine Nachkommen. Gentherapien, die nicht in die Keimbahn eingreifen, akzeptieren wir heute schon, etwa als Behandlungsmethode gegen Krebs, sofern sich die Nebenwirkungen beherrschen lassen. Bei einem Enhancement der Keimbahn hingegen verändern wir Menschen, die wir nicht nach ihrem Einverständnis fragen können. Wir legen damit bis zu einem gewissen Grad fest, was diesen Menschen als gutes Leben erscheinen sollte. Ist das fair? Ich denke, da sollten wir eine Grenze ziehen.

Lebende Gebilde im Labor zu erzeugen: Wäre das der endgültige Abschied von Gottesvorstellungen?
Das glaube ich nicht. Es heißt zwar oft, wenn wir aus unbelebten Molekülen etwas Belebtes bauen, dann haben wir final bewiesen, dass Leben nichts weiter ist als Chemie. Doch an der Faszination des Lebens, die mit seiner Selbstorganisation zu tun hat, würde sich ja dadurch nichts ändern. Vielleicht sollten wir deshalb auch nicht davon sprechen, Leben zu erschaffen, sondern davon, Bedingungen herzustellen, unter denen es sich bildet und erhält.

Das Gespräch führte **Spektrum**-Redakteur **Frank Schubert**.



BIOLOGIE

DIE UNVERWUNDBARE ZELLE

Biologen arbeiten an einem künstlichen Organismus, dem kein Virus etwas anhaben kann. Als Nächstes könnten sie menschliche Zellen herstellen, die immun gegen Virenangriffe sind.

Rowan Jacobsen schreibt über Biologie, Umwelt und Ernährung. Er lebt in Vermont, USA, und wurde für seine Arbeiten mehrmals ausgezeichnet.

⏩ spektrum.de/artikel/1661434

Viren kapern die zelluläre Maschinerie, um sich zu vermehren. Umcodierte Zellen sollen gegen solche Angriffe immun werden.

DESIGN CELLS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Ein winziger Angreifer, etwa 1000-mal kleiner als seine Beute, landet auf einem Bakterium der Art *Escherichia coli*. Sechs dünne Beine geben einem Körper Halt, der anmutet wie eine Spritze mit einem riesigen Kopf. Durch eine Pore injiziert er seine DNA in die Zelle von *E. coli*, die daraufhin beginnt, anhand dieses Bauplans viele weitere Kopien des Aggressors anzufertigen. Bei ihm handelt es sich um den Lambda-Phagen, und wie unzählige Viren vor ihm kapert er gerade die zelluläre Maschinerie seines Opfers, um sich zu vermehren. Weil er lediglich aus einer Proteinkapsel mit Blaupausen zur Produktion weiterer Kopien seiner selbst besteht, kann der Bakteriophage ohne fremde Hilfe kein neues Material aufbauen. Die feindliche Übernahme funktioniert, weil alle Organismen – von Schnupfen auslösenden Rhinoviren bis zum Rhinozeros auf den Ebenen Afrikas – dasselbe Codiersystem verwenden, das auf Nukleinsäuren wie der DNA basiert. Einmal mit dem Code gefüttert, baut eine Zelle anhand der enthaltenen Anweisungen Proteine zusammen.

Im infizierten Bakterium bilden sich jetzt neue virale Proteine. Innerhalb von Minuten wird die Zelle platzen und eine Vielzahl brandneuer Lambda-Phagen freisetzen – von denen jeder einzelne ein neues Bakterium befallen wird, so dass sich der Vermehrungszyklus immer aufs Neue wiederholt. Doch plötzlich stoppt die zelluläre Maschinerie. Zum ersten Mal im ewigen Zweikampf zwischen Virus und Zelle kann die Zelle die Virus-DNA nicht mehr richtig lesen. Damit ist das Ende des Bakteriophagen eingeläutet.

Denn der spezielle *E.-coli*-Stamm, den das Virus befallen hat, wurde gentechnisch umprogrammiert. Er nutzt als Betriebssystem nun eine DNA, die es noch nie zuvor gegeben hat und mit der der virale Code inkompatibel ist. Damit bleibt der Phage machtlos, ähnlich wie ein Windows-Computervirus in einem Mac. Das gleiche Schicksal wird den anderen angreifenden Viren beschieden sein. So sieht die Vision der Wissenschaftler aus, die zurzeit das Bakterium mit dem neuen Code – sie nennen es *rE.coli-57* – erschaffen. Sie glauben, dass es wegen dieser Eigenschaft gegenüber allen Viren immun sein wird, und haben große Pläne damit.

Eine Forschungsgruppe unter Leitung der jungen Biologin Nili Ostrov legt derzeit in einem Labor an der Harvard Medical School letzte Hand an den Zusammenbau von *rE.coli-57.* In den letzten fünf Jahren hat sich die Wissenschaftlerin intensiv mit jedem Detail der genetischen Nachgestaltung des Bakteriums beschäftigt und zermürbende Stunden im Labor verbracht. Es ist das bisher aufwändigste Gen-Editierungs-Projekt in der Geschichte: 2016 identifizierten Ostrov und ihre Mitarbeiter 148 955 DNA-Abschnitte, die geändert werden müssen, um die Zelle vor Viren zu schützen; 63 Prozent davon hatten sie zu diesem Zeitpunkt bereits modifiziert, ohne dass das Bakterium in seiner Funktionsweise beeinträchtigt war.

Inzwischen, im Jahr 2019, ist die nachgebaute Zelle fast fertig. Schon bald wird das eben vorgestellte Szenario nicht nur mit einem, sondern mit Hunderten von Viren in einer Petrischale ablaufen. Falls *rE.coli-57* planmäßig überlebt, könnte das die Beziehung zwischen Viren und ihren Opfern – einschließlich der Menschen – für immer verändern.

Auf jedem Quadratmeter unseres Planeten existieren rund 800 Millionen Viren. Sie infizieren uns zum einen mit mehr oder weniger bedrohlichen Krankheiten; zum anderen bringen sie ganze Industriezweige, die ihre Produkte mit Hilfe von Zellkulturen herstellen, immer wieder in Bedrängnis. So verlor der Biotech-Riese Genzyme (inzwischen zu Sanofi gehörig), der Bakterien zur Wirkstoffproduktion einsetzt, die Hälfte seines Börsenwerts, nachdem 2009 eine Virusinfektion in seinem Werk in Allston, Massachusetts, die Produktion lahmgelegt und damit einen kritischen Engpass in der weltweiten Versorgung mit dem Medikament Cerecyme hervorgerufen hatte. Auch in der Milchwirtschaft sind Viren eine kostspielige Plage, denn hier braucht es Bakterien zum Fermentieren von Käse und Jogurt. Sind diese kontaminiert, müssen die Produkte entsorgt werden. Ein virusresistentes Bakterium wäre ein Milliardengeschäft.

Minifabrik für Designer-Medikamente

Darüber hinaus könnte solch eine Zelle eine ganz neue Welt für speziell designte Arzneimittel eröffnen. »Wenn wir raffinierte Antikörper oder ausgefallene Arzneimittel auf Proteinbasis produzieren möchten, müssen wir der Zelle neue chemische Bausteine zur Verfügung stellen«, sagt Ostrov. »Das wäre ein ganz neues Konzept für die Pharmaindustrie.« Zum Aufbau von Proteinen stehen der Natur von Haus aus 20 verschiedene Aminosäuren zur Verfügung. Das veränderte Betriebssystem von *rE.coli-57* würde es erlauben, anhand exotischer Aminosäuren neue Proteine aufzubauen, so wie man mit neuen Legosteinen einen aus einer Starterpackung erstellten Bau erweitern kann. Mit Hilfe speziell konzipierter Designer-Proteine ließen sich Krankheiten wie Aids oder Krebs möglicherweise hochpräzise bekämpfen.

Beim Umschreiben des zellulären Codes (man spricht von Recodierung) ändert man die Sprache, auf deren Grundlage die Zelle ihre Proteine aufbaut – also jene Moleküle des Lebens, die dafür sorgen, dass alles funktioniert. Sie bestehen aus kleineren Einheiten, den Aminosäuren, von denen jede durch einen Drei-Buchstaben-Code aus einer Kombination der vier Nukleinbasen A(denin), C(ytosin), G(uanin) und T(hymin)

AUF EINEN BLICK

NEUES BETRIEBSSYSTEM FÜR DIE ZELLE

1 Virale Attacken auf Zellen verursachen nicht nur Krankheiten, sie kosten die Biotechnologiebranche auch Milliarden.

2 Ein amerikanisches Forschungsteam will das Bakterium *Escherichia coli* für Viren unangreifbar machen, indem es dessen genetischen Code umschreibt.

3 Falls die neu gestaltete Zelle wie geplant funktioniert, könnte das der Erzeugung virusresistenter menschlicher Zellen den Weg bereiten.

definiert ist. So steht beispielsweise das Basentriplett TGG für die Aminosäure Tryptophan und CAA für Glutamin. Solch ein spezifisches Basentriplett wird als Codon bezeichnet; jedes Gen stellt eine lineare Abfolge von Codons dar.

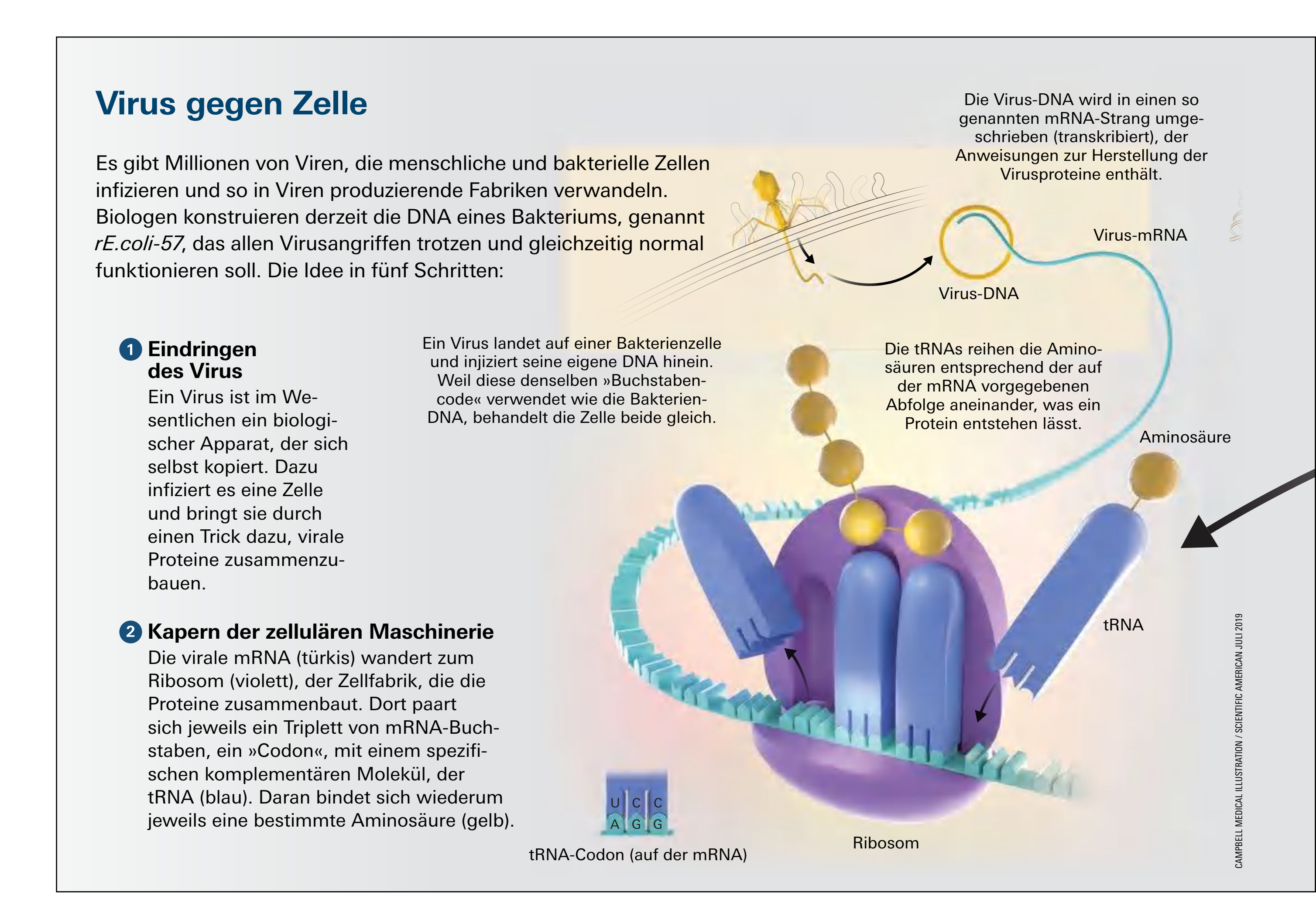
Beim Zusammenbau von Proteinen wird diese Sequenz in eine mRNA umgeschrieben und diese als Bauplan an die Ribosomen geschickt, die zellulären Fabriken. Hier werden die Codons mit so genannten transfer-RNAs (tRNAs) gepaart, die als Adapter fungieren: Jede tRNA bindet mit einem Ende an ein bestimmtes Codon, mit dem anderen an eine spezifische Aminosäure. Während die Sequenz von Codons diese Protein-Fertigungsstraße durchläuft, reihen die tRNAs die Aminosäuren aneinander, bis das Protein fertig gestellt ist.

Eine Besonderheit an diesem System ist die große Redundanz. Da auf Grund der Dreier-Kombinationen der vier Basen A, C, G und T insgesamt 64 ($4^3 = 64$) unterschiedliche Kombinationen möglich sind und es demzufolge 64 Codons gibt, sind die meisten der 20 natürlichen proteinbildenden Aminosäuren mehrfach codiert. Manche von ihnen besitzen sogar sechs verschiedene Basentripletts, etwa Arginin, für das die Codons AGG, CGA und noch vier weitere stehen.

2004 fragte sich der in Harvard tätige Genetiker George Church, in dessen Forschungsgruppe Ostrov heute arbeitet, ob all diese Codons tatsächlich notwendig sind. Was würde passieren, wenn im Genom von *E. coli* jedes AGG gegen ein CGA ausgetauscht würde? Schließlich codieren beide Tripletts für die Aminosäure Arginin, und daher sollte das Bakterium weiterhin alle Proteine korrekt herstellen. Tilgte man aber auch die tRNA, die sich mit AGG paart, aus der Zelle, dann würde das AGG-Codon in eine Sackgasse führen, also zu einem Kettenabbruch bei der Proteinbildung.

»Mir wurde klar, dass die Zellen dann gegen alle Viren resistent würden. Und das wäre möglicherweise ein enormer Vorteil«, erzählt Church. Viren wie der Lambda-Phage sind darauf angewiesen, dass die von ihnen infizierte Zelle ihren Gencode korrekt abliest und in Proteine übersetzt. Wenn allerdings die zu AGG komplementäre tRNA nicht mehr in der Zelle vorhanden ist, wird jedes virale Gen, das ein AGG-Codon enthält, vergeblich auf sie warten, und es wird kein Virusprotein mehr fertig gestellt.

Da sich Viren rasend schnell weiterentwickeln, vermutete Church, dass sie rasch einen Weg finden würden, trotz der einen verschwundenen tRNA zu arbeiten. Entfernte man allerdings genügend Codons und die dazugehörigen tRNAs, sollte es dem Virus nahezu unmöglich sein, durch spontane Mutationen die richtige Kombination zur Nutzung des veränderten Codes zu treffen. Um den Aufwand einigermaßen zu begrenzen, wählten die Wissenschaftler als Ausgangspunkt



für ihre Arbeiten einen *E.-coli*-Stamm, aus dessen Genom »unnütze« Abschnitte bereits herausgeschnitten worden waren, so dass es »nur« noch aus knapp vier Millionen Basenpaaren besteht. In diesem *E. coli* MDS42 genannten Stamm gibt es sieben Codons, die relativ selten auftreten; sie kommen in allen 3548 Genen vor, pro Gen im Schnitt 17-mal. Falls alle entsprechenden tRNAs beseitigt würden, müsste ein Virus also etwa 60000 neue Sequenzen entwickeln, von denen jede einzelne das korrekte Ersatzcodon an genau der richtigen Stelle aufweist. Und das erschien ihm ziemlich unwahrscheinlich.

Das künstliche Genom kommt aus dem DNA-Drucker

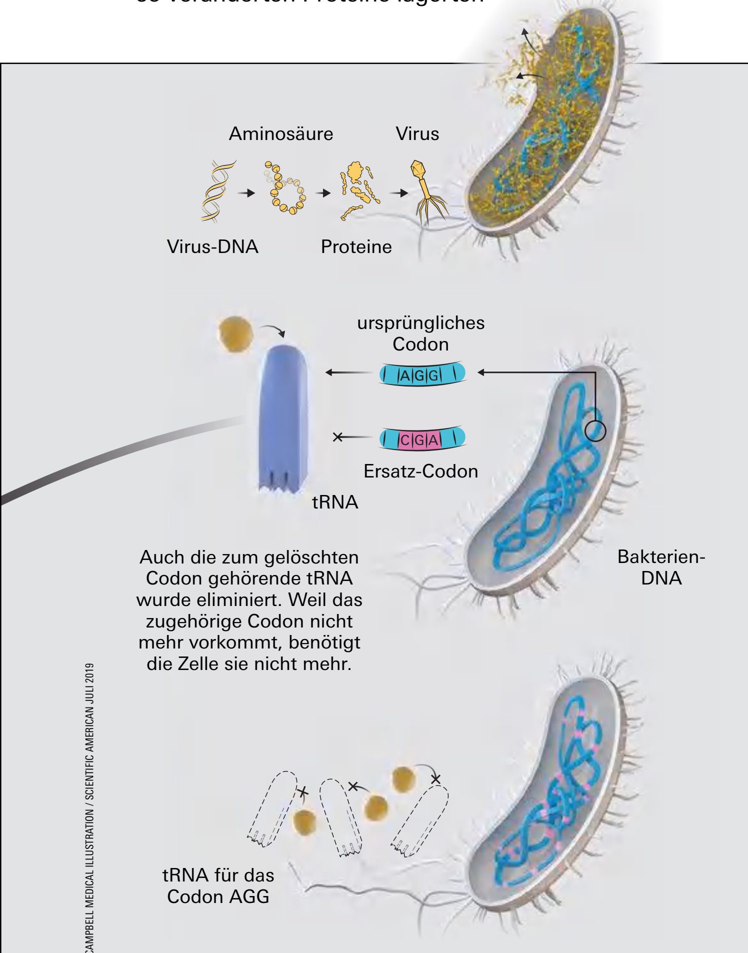
2004 existierte dieses Szenario nur als Gedankenexperiment. Es war schon schwierig genug, ein einzelnes Gen in einem Organismus zu verändern; Tausende von Genen zu bearbeiten, um die betreffenden Codons an jeder Stelle, an der sie auftraten, zu entfernen, war unmöglich. Zehn Jahre später hatten technische Fortschritte die Umsetzung jedoch in den Bereich des Vorstellbaren gerückt.

Just zu der Zeit kam Ostrov als Postdoc in Churchs Labor. War er der Architekt von *rE.coli-57*, so wurde sie dessen Ingenieurin. Sie hatte viel Erfahrung im Aufbau von Molekülen. An der Universität in Tel Aviv hatte sie ein Protein modifiziert, indem sie ihm Aminosäuren hinzugefügt hatte, die an ein Metallzentrum banden. Mehrere der so veränderten Proteine lagerten sich zu einem Nanodraht zusammen, der Strom leiten konnte. Später promovierte sie an der Columbia University mit einer Arbeit, bei der sie Bäckerhefe dazu brachte, zum Nachweis einer Kontamination mit krankheitserregenden Mikroben rote Pigmente zu bilden. Auf Grund der Einsatzmöglichkeit zur Cholera-Erkennung wurde das Projekt von der Bill & Melinda Gates Foundation gefördert.

Selbst verglichen mit diesen Errungenschaften war Churchs Projekt um ein Vielfaches komplexer. Die sieben zu ersetzenden Codons treten 62214-mal im *E.-coli*-Genom auf. Um sie alle neu zu codieren, sind 148955 Veränderungen in der DNA erforderlich. Die CRISPR-Cas9-Methode, die es ermöglicht, einzelne Gene schnell und einfach zu editieren, begann zu jener Zeit Schlagzeilen zu machen. Doch es gab noch kein Werkzeug, das in der Lage gewesen wäre, auch nur annähernd so viele Änderungen vorzunehmen.

Fortschritte in der DNA-Synthese rückten eine andere Lösung in den Blick: ein umprogrammiertes *E.-coli*-Genom komplett künstlich aufzubauen. DNA lässt sich biochemisch mit speziellen DNA-Druckern aufbauen, die wie ein Tintenstrahldrucker die Basen A, C, G und T in einer vorgegebenen Reihenfolge aufeinander aufsprühen. Darauf spezialisierte Unternehmen können derzeit DNA-Stücke mit einer Länge von bis zu etwa 4000 Buchstaben zuverlässig synthetisieren.

Im Jahr 2015 luden sich Ostrov und ihr Team das Genom von *E. coli* MDS42 von einer Datenbank herunter, durchforsteten die gesamte Sequenz und tauschten alle 62214 Positio-



3 Explosionsartige Vermehrung

Virusproteine lagern sich zusammen und erzeugen auf diese Weise zahlreiche Kopien des Virus, bis die Zelle damit gefüllt ist. Anschließend brechen die Viren aus und infizieren weitere Zellen.

4 Virusresistente DNA

Um zu verhindern, dass sich ein Virus der zellulären Maschinerie bemächtigt, haben Wissenschaftler das gesamte Genom der Bakterienzelle umgeschrieben. Dazu haben sie bestimmte Codons (hellblau) jeweils durch synonyme Codons (rosa) ausgetauscht, die für dieselbe Aminosäure stehen. Die Zelle kann also weiterhin alle benötigten Proteine herstellen.

5 Gescheiterte Replikation

In der viralen DNA und mRNA ist noch das ursprüngliche Codon enthalten. Beim Proteinzusammenbau fordert dieses vergeblich die zu ihm komplementäre tRNA an. Weil Letztere in der Zelle nicht mehr vorhanden ist, kann auch die entsprechende Aminosäure nicht eingebaut werden, und es wird kein virales Protein mehr fertig gestellt. Der Zusammenbau des Virus kommt zum Erliegen, der Erreger kann der Zelle nichts anhaben.

nen, an denen sich die sieben seltenen Codons befanden, gegen synonyme Tripletts aus. Aus Sicherheitsgründen veränderten sie die Bakteriengene auch dahingehend, dass die Mikrobe auf die in der Nährlösung enthaltenen synthetischen Aminosäuren angewiesen ist. Da diese künstlichen Moleküle nicht in der Natur vorkommen, kann das Bakterium außerhalb des Labors nicht überleben. Als Ergebnis lief nun die Sequenz des neuen *rE.coli-57*-Genoms über den Computerbildschirm. Die Wissenschaftler teilten diese vier Millionen Buchstaben in je 4000 Basen umfassende Abschnitte mit überlappenden Enden auf und schickten die Dateien zu einem DNA-Synthese-Unternehmen. »Wir zerschnitten das Genom auf dem Computer wie eine Textdatei«, erzählt Ostrov. Die Firma druckte die DNA und sandte sie per Paketpost zurück. Anschließend baute die Arbeitsgruppe die gelieferten Stücke zu 87 großen Fragmenten von jeweils 50 000 Buchstaben zusammen. Diese Länge entspricht im Bakterium etwa 40 Genen.

Schritt für Schritt werden die künstlichen Sequenzen in funktionierende Zelllinien eingebaut

Doch um diesen Code zum Leben zu erwecken, benötigt man eine Zelle – und diese künstlich aufzubauen, ist ebenfalls wissenschaftliches Neuland (siehe Artikel ab S. 12). Daher ersetzte die Gruppe das Genom bestehender *E.-coli*-Kolonien Stück für Stück durch umcodierte Fragmente: In einem Brutschrank züchteten Ostrov und ihr Team 87 Kolonien von *E.-coli*-Bakterien, bauten in Teile davon jeweils ein 50 000 Buchstaben umfassendes, neu codiertes Teilstück ein und warteten ab, ob die Mikroben überlebten. Sie machten sich keine allzu großen Hoffnungen – vielleicht hatten sich die Codons ja aus noch unbekannten Gründen so entwickelt.

Erstaunlicherweise vertrugen die meisten Kolonien die Manipulation gut. Nur 20 der veränderten DNA-Abschnitte sorgten dafür, dass die Mikroben ihr Wachstum einstellten. Um *rE.coli-57* vor Viren zu schützen, muss aber jeder einzelne der umgeschriebenen Abschnitte korrekt funktionieren. »Zunächst versuchten wir herauszufinden, welches spezifische Gen nicht funktionsfähig ist«, berichtet Ostrov. »Dazu teilten wir das 40-Gen-Segment in zwei Abschnitte mit jeweils 20 Genen und testeten diese. Zur weiteren Eingung des Problems verkürzten wir die Abschnitte auf vier Gene, schließlich auf eins. Zuletzt fanden wir das aller Wahrscheinlichkeit nach ›schuldige‹ Codon.«

Es zeigte sich, dass die Probleme auf Fehler beim DNA-Druck zurückzuführen waren: Die erhaltenen Basensequenzen stimmten nicht exakt mit den bestellten überein – bis vor nicht allzu langer Zeit ein verbreitetes Problem bei der DNA-Synthese. Nachdem das Team neue, korrekte Sequenzen erhalten hatte, arbeiteten mehr als 99 Prozent der neu gestalteten Gene fehlerfrei. Die Idee der Recodierung war also nicht so abwegig wie anfangs gedacht.

Trotzdem blieben noch einige Probleme offen, die nichts mit »Druckfehlern«, sondern mit der Funktionsfähigkeit der Proteine beziehungsweise der DNA zu tun hatten. Was steckte dahinter? Warum kann der Tausch gegen ein synonymes Codon, das exakt dieselbe Aminosäure codiert, einen Organismus schädigen oder sogar töten?

So verlangsamte sich etwa die Reproduktionsrate in Bakterien, in denen ein bestimmter »Abschnitt 21« verändert worden war, auf Schneckentempo. Weshalb? Mangels Fachliteratur analysierte Ostrov sorgfältig die Leistungsfähigkeit aller Gene in diesem Abschnitt und verglich die Genprodukte mit denen in nicht manipulierten Bakterien. Sie fand fünf zusammenhängende Gene, die zwar intakt, aber aus unerfindlichen Gründen nun inaktiv waren.

Wie sich herausstellte, fehlte ihnen sozusagen der genetische Startknopf. Genen sind so genannte Promotoren vorgeschaltet; das sind DNA-Sequenzen, die vorgeben, ob die nachfolgenden Abschnitte aktiv oder inaktiv sind. In höheren Lebensformen sind Promotoren und Gene mit deutlich erkennbaren Anfangs- und Endpunkten voneinander abgegrenzt. Bakterielle Gene hingegen überlappen sich manchmal, so dass die DNA-Sequenz am Ende des einen gleichzeitig den Anfang des nächsten darstellt. Ostrov fand heraus, dass eine Basenabfolge in einem Gen namens *yceD* gleichzeitig als Promotor für die fünf nachfolgenden Gene fungierte. Bei der Umcodierung von *yceD* waren diese versehentlich ausgeschaltet worden. Also änderte sie drei Codons in dem betreffenden Gen, so dass die Basensequenz jener eines bekannten starken Promotors ähnelte. Die fünf Gene wurden daraufhin aktiv, und die Bakterien vermehrten sich normal.

Als noch größere Herausforderung entpuppte sich der umcodierte »Abschnitt 44«: Wo er eingebaut wurde, starben die Kolonien. Die Wissenschaftler grenzten den problematischen Bereich auf ein Gen namens *accD* ein, das Bakterien zur Produktion von Fettsäuren benötigen. Die modifizierten Zellen konnten das entsprechende Protein nicht mehr herstellen. Nach einer genauen Analyse vermutete Ostrov das Problem direkt am Anfang der Sequenz. In der DNA gehen normalerweise die Basen A und T Bindungen miteinander ein, ebenso die Basen G und C. Bei einer bestimmten Buchstabenreihenfolge – zum Beispiel vielen Ts nach vielen As – kann sich das Ende des Moleküls wie ein Klebeband an sich selbst anheften und so die zelluläre Maschinerie blockieren. Am Computer gestaltete Ostrov das Gen neu und ersetzte 10 der

Bald wird es einen *E.-coli*-Stamm mit 100 Prozent neu codiertem Genom geben

15 umcodierten Codons durch gleichbedeutende andere, die mit geringerer Wahrscheinlichkeit klebrige Faltungen ausbilden sollten. Als sie diese verbesserten DNA-Stücke in die Bakterien einbrachte, erwachte die Kolonie zu neuem Leben.

Mit diesem ingenieurwissenschaftlichen Ansatz wurde ein Fehler nach dem anderen beseitigt. Bemerkenswerterweise gab es keine ausweglosen Sackgassen. »Bislang hatten wir keine irreparablen Stellen«, sagt Ostrov. »Der Code lässt uns viel Spielraum.«

Indem sie funktionsfähige Gensegmente von einem Stamm zu denen eines anderen transferierte, verwandelte sie in diesem Jahr die ursprünglich 87 Stämme in acht intakte Linien, die jeweils ein Achtel des komplett neu co-

dierten Genoms enthielten. Jedes Mal, wenn das Team Segmente miteinander kombinierte, mussten neue Inkompatibilitäten behoben werden. Doch im Frühjahr wurden aus den acht Linien rasch vier, und dass daraus zwei werden, ist bereits abzusehen. Bald wird es also einen *rE.coli-57*-Stamm mit 100 Prozent neu codiertem Genom geben.

Sobald dieser funktioniert, werden im letzten Schritt die mit den eliminierten Codons assoziierten tRNAs entfernt. Anschließend wird sich im Experiment zeigen, ob dieser Schachzug die Viren tatsächlich außer Gefecht setzt wie postuliert. Ostrov plant dazu das Bakterium in einer Art mikroskopischer Arena einzusperren, wo es gegen immer neue virale Gegner antreten muss.

In einem kleinen Glasbehälter wird in einer Petrischale eine intakte Kolonie *rE.coli-57* wachsen. Die Biologin wird dann den Lambda-Phagen dazugeben und zusehen, wer gewinnt. Wenn *rE.coli-57* überlebt, wird ein anderes Bakterien befallendes Virus in den Ring geführt, dann wieder ein anderes und so weiter. Ostrov hält sich bezüglich eines Termins für diesen Wettbewerb noch bedeckt, ist aber überzeugt, dass sie mit ihrem Team kurz vor dem Ziel steht.

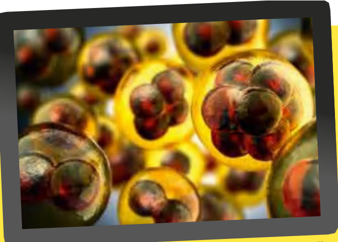
Virusresistente menschliche Zellen: Der nächste logische Schritt?

Schon seine Immunität gegenüber Viren wird *rE.coli-57* wertvoll machen. Darüber hinaus wird das Bakterium auch »ein einzigartiges Gehäuse mit erweiterter synthetischer Funktionalität bieten, die in der Biotechnologie breite Anwendung finden wird«, wie Ostrov und Kollegen in ihrer Veröffentlichung von 2016 schrieben. In anderen Worten: Mit Hilfe der Mikrobe sollen flexibel neue Arten von Proteinen produziert werden. Für die Wirkstoffentwicklung könnte das ein Segen sein: Viele Krebsmedikamente und Immuntherapeutika sind Proteine, die der Körper rasch abbaut. Sie mit exotischen Aminosäuren neu zu konstruieren, würde ihre Überlebenszeit im Körper möglicherweise enorm verlängern. Church hat zur Entwicklung solcher Arzneimittel das Start-up GRO Biosciences gegründet (das Akronym steht für »genomically recoded organism« – genomisch umcodierter Organismus).

Es zeichnet sich ab, dass in ein paar Jahren auch die Vision umcodierter virusresistenter menschlicher Zellen Gestalt annimmt. Für die medizinische Forschung wäre dies von unschätzbarem Wert, da sie humane Zelllinien als Modell im Labor nutzt, um neue Arzneimittel und Therapien zu entwickeln und zu testen. Sind diese einmal durch Viren infiziert, ist es nahezu unmöglich, die Erreger wieder loszuwerden – die Experimente müssen verworfen und erneut durchgeführt werden, was die Entwicklungsdauer von Wirkstoffen verzögert. Das Center of Excellence for Engineering Biology (Kompetenzzentrum für synthetische Biologie), ein globales Gemeinschaftsprojekt mit Church als Gründungsmitglied, hat das Umcodieren menschlicher Zellen zu seinem ersten Projekt erklärt. Schon eine einzige menschliche Zelle in der Petrischale umzuprogrammieren, wäre ein Riesenunterfangen, selbst wenn *rE.coli-57* einen Meilenstein auf dem Weg dorthin darstellt: Das menschliche Genom ist mit 3,2 Milliarden Buchstaben rund 800-mal größer als das des Bakteriums.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/biologie-der-zelle**



BLACKJACK3D / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Idee, das Betriebssystem menschlicher Zellen neu zu gestalten, wird kontrovers diskutiert. Kritiker merken zum einen an, die derart modifizierten Zellen bildeten die natürlichen möglicherweise nicht zuverlässig nach. Darüber hinaus weckt der Plan die Befürchtung, dass uns eine solche Recodierung der Erschaffung von Menschen mit Designer-DNA ein Stück näher bringt. Denn auch wenn es nicht das Ziel des Kompetenzzentrums ist, die Zellen über eine kultivierte Zelllinie hinaus zu nutzen, könnte es möglich sein, einen umcodierten Menschen zu schaffen, der ebenfalls gegen Viren resistent ist.

»Das wäre schlecht«, warnt der an der Columbia University tätige Virologe Vincent Racaniello. In seinem Blog hat er sich kritisch mit diesem Szenario befasst. »Es gibt einen Grund für die redundanten Codons – unter anderem schützen sie vor tödlichen Mutationen«, schrieb er. »Ein derartiges Umschreiben des menschlichen Genoms dürfte nicht ohne schwer wiegende Nebenwirkungen bleiben.«

Keiner der am Projekt Beteiligten hat leichtfertige Experimente mit Menschen vorgeschlagen. Sie betonen jedoch, dass eine sorgfältig durchgeführte transparente Studie zum Verhalten umcodierter menschlicher Zellen neues Licht auf unser Verhältnis zu den schädlichsten Krankheiten werfen könnte. Seit die Menschen existieren, sind sie nicht über das 64-Codon-System hinausgekommen – und die krankheitsverursachenden Viren haben davon profitiert. In einigen Jahren könnten wir wissen, ob wir diese Situation akzeptieren müssen oder nicht.

Ostrov ist an dem Projekt des Zentrums nicht beteiligt. »Ich codiere keine menschlichen Zellen um«, stellt sie klar. Nichtsdestoweniger sei es wichtig, diese genetischen Fragestellungen in einer sicheren Laborumgebung zu erforschen. Natürlich seien in der Evolution die Codons nicht grundlos so entstanden, wie sie sind. »Aber wir wissen, dass andere Optionen tragfähig sind. Wenn wir Codons ändern, können wir untersuchen, was passiert, und das kann uns helfen, die zu Grunde liegenden Regeln besser zu verstehen.« ◂

QUELLEN

Chari, R., Church, G.M.: Beyond editing to writing large genomes. Nature Reviews Genetics 18, 2017

Ostrov, N. et al.: Design, synthesis, and testing toward a 57-codon genome. Science 353, 2016

WEBLINK

www.virology.ws/2018/05/03/virus-proof-cells

Kritische Sicht auf die Umcodierung menschlicher Zellen

POLYMERCHEMIE

WIEDERVERWERTBARE HOCHLEISTUNGSKUNSTSTOFFE

So genannte Duroplasten werden vielseitig eingesetzt – Kunststoffe, die weder verformt noch recycelt werden können. In einem neuen Material mit speziellen chemischen Verbindungen hingegen ist die Wiederverwertbarkeit quasi eingebaut, bei gleich bleibend hochwertigen Eigenschaften.

Die meisten Kunststoffe, die derzeit verwendet werden, sind nicht einfach zu recyceln. Das hat schwer wiegende Umweltprobleme sowie weltweite wirtschaftliche Einbußen zur Folge und verschlingt endliche natürliche Ressourcen. Eine in der Industrie beliebte Kunststoffsorte sind Duroplasten, da sie sehr widerstandsfähig gegenüber mechanischen Belastungen und hohen Temperaturen sind. Gerade sie lassen sich aber nur schwer wiederverwerten, da sie nicht mit Hilfe von Hitze oder Lösungsmitteln recycelt werden können. Eine Forschungsgruppe um Peter R. Christensen vom Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA hat nun Duroplasten entwickelt, die spezielle chemische Bindungen aufweisen. Diese als Diketoenaminbindungen bezeichneten Verknüpfungen können sich innerhalb des Polymernetzwerks umstrukturieren.

Dadurch lassen sich die neuen Kunststoffe in einem energieeffizienten Prozess wiederverwerten. Man



Szenen wie diese auf Bali (Indonesien) am 19. Dezember 2017 zeigen deutlich: Von einer Kreislaufwirtschaft, in der Kunststoffe wiederverwendet werden, sind wir noch weit entfernt.

KOLDUNOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

Ein flexibles Netzwerk von Polymerketten

Die Forschungsgruppe um Peter R. Christensen hat einen Kunststoff entwickelt, den man relativ leicht in seine Einzelteile zerlegen und wieder aufbauen kann. Er gehört zur Gruppe der Duroplasten, die beständig gegen Hitze und mechanische Belastungen sind. Das Polymer entsteht aus Aminen (rosa) und Triketonen (blau). Die langen Molekülketten sind durch Diketoenaminbindungen miteinander vernetzt. Bei diesen Querverbindungen handelt es sich um dynamische kovalente Bindungen: Sie können sich innerhalb des Polymers umordnen, da Aminogruppen (NH_2-Gruppen) der verschiedenen Polymerketten mit den Diketoenamingruppen reagieren. Behandelt man den Kunststoff mit einer starken Säure, erhält man die ursprünglichen Monomere, die sich erneut zum Polymer zusammensetzen lassen.

Amine
Triketone
zermahlen
Säure
dynamisches Netzwerk
NH_2
NH_2
Diketoenamin

NATURE: JEHANNO, C., SARDON, H.: A STEP TOWARDS TRULY RECYCLABLE PLASTICS. NATURE 568, 2019, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

zerlegt dabei das Material in seine ursprünglichen Einzelbausteine und kann diese anschließend zu neuen Duroplasten zusammensetzen, die mit dem Ausgangsmaterial beinahe identisch sind.

In herkömmlichen Kunststoffen sind sich wiederholende Moleküleinheiten, Monomere genannt, zu langen Ketten von Polymeren aneinandergereiht. Diese sind so gestaltet, dass sie gegen Umwelteinflüsse wie Licht, Wasser oder Hitze bestehen können. Prinzipiell können zwar die meisten weit verbreiteten Kunststoffe wiederverwertet werden, doch das ist in der Regel kostspielig, energieaufwändig und ergibt oft Materialien von geringer Qualität. Daher sind recycelte Kunststoffe normalerweise nicht so gut einzusetzen wie neu hergestellte Polymere.

Duroplasten erweisen sich als besonders problematisch, weil die Polymerketten durch so genannte kovalente Bindungen fest miteinander verknüpft sind. Diese Quervernetzungen machen die Materialien deutlich beständiger gegenüber Lösungsmitteln und verleihen ihnen bessere thermomechanische Eigenschaften im Gegensatz zu den Thermoplasten – einer Familie der Polymere, die keine solchen Querverbindungen zwischen den Molekülketten aufweist. Daher sind Duroplasten etwa für Hochtemperaturelektronik oder die Automobilindustrie attraktiv. Momentan machen sie rund 15 bis 20 Prozent der weltweiten Plastikproduktion aus. Dass sie nicht umgeformt oder recycelt werden können, ist jedoch ein großer Nachteil.

Aus diesem Grund versuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Materialien zu finden, die energieeffizient wiederzuverwerten beziehungsweise umzuformen sind, ohne dass ihre herausragenden chemischen und thermischen Eigenschaften darunter leiden. Ein Ansatz dazu sind Polymer-

netzwerke, die sich strukturell neu anordnen können. Solche Kunststoffe würden unter den meisten Bedingungen die erwünschten duroplastischen Eigenschaften aufweisen, ließen sich aber durch bestimmte Auslöser bei Bedarf in eine andere Gestalt bringen.

Beispielsweise wurde in den letzten zehn Jahren die Klasse der Vitrimere intensiv erforscht. Diese haben ein ähnliches Fließvermögen wie Glas: Beim Erhitzen beginnen sie zu fließen, da sich die kovalenten Bindungen zwischen den Molekülketten dann lösen und neu bilden. So lassen sie sich thermisch umformen und eventuell auch recyceln. Unter den hohen Temperaturen leidet aber die Qualität.

Recycling auch in Gegenwart von weiterem Plastikmüll

Wissenschaftler haben bereits Duroplasten entworfen, die sich bei niedrigen Temperaturen unter sauren Bedingungen in ihre Einzelbausteine zerlegen lassen. Das ermöglicht es, diese Kunststoffe in geschlossenen Kreisläufen wiederzuverwenden: Die Monomere gewinnt man durch eine solche Depolymerisation wieder und bildet anschließend aus ihnen den Kunststoff neu. Trotzdem sind die Monomer-Umsetzungsraten noch nicht gut genug und das Vorgehen muss an industrielle Prozesse angepasst werden. Außerdem fehlt noch ein Weg, sie innerhalb einer Mischung aus Kunststoffabfällen zu zerlegen.

Auf der Suche nach Duroplasten, die in geschlossenen Kreisläufen verwendet werden können, hat die Forschergruppe um Christensen Polymere entworfen, die auf der Basis von Diketoenaminbindungen dynamische Netzwerke ausbilden (siehe »Ein flexibles Netzwerk von Polymerketten«, S. 27). Letztere entstehen fast spontan aus den Ausgangsstoffen in einem lösungsmittelfreien Prozess, mit dem sich prinzipiell viele analoge Materialien produzieren ließen.

Seit Kurzem ist bekannt, dass Ketoenamingruppen sich innerhalb eines Polymernetzwerks reorganisieren und die Bildung neuer Polymere ermöglichen. Ihre chemische Struktur ähnelt den Diketoenamingruppen, die zwei Carbonylgruppen (C=O) besitzen, Ketoenamingruppen haben aber nur eine. Laut früheren Studien sind Polymernetzwerke, die solche Ketoenamine enthalten, stabil gegenüber Säuren. Christensen und seine Gruppe entdeckten jedoch überraschend, dass sie ihr Diketoenamin-Netzwerk in seine Einzelbestandteile zerlegen konnten, wenn sie es mit starker Säure behandelten. Der Prozess dauert weniger als zwölf Stunden und ergibt eine exzellente Ausbeute an Monomeren.

Man nimmt an, dass die zweite C=O-Gruppe in den Diketoenamin-Querverbindungen für die Reaktivitätsunterschiede verantwortlich ist. Die Forscher konnten zudem die Monomere in einem relativ simplen Prozess zurückgewinnen. Aus diesen Duroplasten ließen sich dann wieder Kunststoffe zusammenbauen, die nahezu dieselben Eigenschaften aufwiesen wie das ursprüngliche Material.

Im nächsten Schritt depolymerisierten die Wissenschaftler ihr Material in Gegenwart anderer weit verbreiteter Kunststoffsorten und Additive, beispielsweise Fiberglas, Farben oder Flammschutzmittel, die oft in Plastikmüll vorkommen, der zur Wiederverwertung gesammelt wird. Die wiederhergestellten Materialien waren nicht mit diesen Substanzen verunreinigt – die Reaktion ist also in Gegenwart vieler verschiedener Zusatzstoffe durchführbar. Das könnte bedeuten, dass man mit Hilfe der Methode sogar Faserverbundwerkstoffe recyceln könnte – eine der größten Herausforderungen in diesem Forschungsfeld.

Bisher arbeiteten die Forscherinnen und Forscher allerdings nur mit Material im Grammbereich. Die Frage ist, ob die Reaktionen auch in den großen Maßstäben durchgeführt werden können, die in der Kunststoffindustrie üblich sind. Darüber hinaus benötigten die Autoren große Mengen sauren und basischen Wassers für das Recycling und die Reinigung der Monomere. Kann solch ein Prozess im Industriemaßstab überhaupt umweltfreundlich sein?

Um die Strategie der Wissenschaftler auf kommerzielle industrielle Prozesse zu übertragen, gilt es nun, dynamische Polymernetzwerke in gängigen Duroplasten einzusetzen, beispielsweise in Polyurethanen, Polyestern oder Epoxidharzen. Akademische und industrielle Forschung müssen gemeinsam Kosten und Nutzen der nächsten Generation von Kunststoffen gegenüber den herkömmlichen abwägen und den Lebenszyklus der Materialien untersuchen. Dazu sollten sich Chemiker auch mit anderen Wissenschaftlern zusammentun, damit sie die Folgen über den gesamten Lebenszyklus abschätzen können.

Die Entwicklung widerstandsfähiger Materialien, die exzellente chemische und hitzeresistente Eigenschaften besitzen und in hohem Grad wiederverwertbar sind, könnte künftig dazu beitragen, den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft zu schaffen, die Müll auf ein Mindestmaß reduziert und die Ressourcen maximal ausschöpft. Plastik der kommenden Generation wird ohne Zweifel mit geschlossenen Produktlebenszyklen vereinbar sein müssen, wenn die Nachfrage der wachsenden Weltbevölkerung befriedigt werden soll. Auf dem Weg zu Kunststoffen mit möglichst geringer Umweltwirkung stellen Arbeiten wie diese einen wichtigen Schritt dar.◂

Coralie Jehanno und **Haritz Sardon** forschen an nachhaltigen Polymerisationsprozessen am Centro Joxe Mari Korta an der Universität des Baskenlandes in San Sebastián in Spanien.

QUELLEN

Christensen, P.R. et al.: Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds. Nature Chemistry 11, 2019

Lloyd, E.M. et al.: Fully recyclable metastable polymers and composites. Chemistry of Materials 31, 2019

Zhu, J.-B. et al.: A synthetic polymer system with repeatable chemical recyclability. Science 360, 2018

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 568, S. 467–468, 2019

NEUROLOGIE

MULTIPLE SKLEROSE IN DER GRAUZONE

Bei der multiplen Sklerose schädigen Immunzellen die Nervenverbindungen in der weißen Hirnsubstanz. Doch das ist nur die halbe Wahrheit: Auch die Zellkörper der Neurone in der grauen Substanz werden attackiert.

Multiple Sklerose (MS) ist eine genetisch bedingte Autoimmunerkrankung, bei der das Immunsystem die Nervenzellen des Gehirns angreift. Die Krankheit wird normalerweise im Frühstadium diagnostiziert. Bei der schubförmig remittierenden Verlaufsform durchleiden die Patienten Phasen mit Symptomen wie Seh- und Gleichgewichtsstörungen oder Lähmungen, die dann wieder nachlassen. Dieses Krankheitsbild lässt sich mittels Tiermodellen gut erforschen. Dagegen wissen die Mediziner über die Faktoren, die den Krankheitsverlauf der fortgeschrittenen progredienten Form bestimmen – bei denen sich die körperlichen Behinderungen schleichend verschlimmern – noch recht wenig. Dabei wären Einblicke in dieses Spätstadium der Erkrankung nötig, um die grundlegenden Ursachen besser behandeln zu können.

Als sicher belegt gilt, dass T-Zellen und Makrophagen die Entzündungsreaktionen der schubförmig remittierenden MS auslösen. Diese Immunzellen schädigen die weiße Substanz des Gehirns, in der die Nervenfasern der Neurone, die Axone, liegen. Ihr Angriff richtet sich gegen Myelin, einer Mischung aus Lipiden und Proteinen, welche die Nervenfasern in der weißen Substanz umhüllt und damit isoliert und schützt (siehe »Zwei Angriffsziele der multiplen Sklerose«, S. 30 links).

Die allmählich zunehmenden Zerstörungen in der sich oft anschließenden progredienten Phase finden dagegen vor allem in der grauen Hirnsubstanz statt, in der die Zellkörper der Neurone mit den Zellkernen liegen. Medikamente, die das Immunsystem unterdrücken, unterbinden

Unsere Neuerscheinungen!

Alle Sonderhefte auch im PDF-Format



Gravitation: Gibt es die Dunkle Materie wirklich? • Sternsysteme: Der Stammbaum der Sonne • Messkampagnen: Ein Himmel voller Exoplaneten • Detektoren: Eine Falle für Axionen • Dunkle Energie: Streit um Hubbles Erbe • € 8,90; ab 23.08. 2019



Gentherapie: Auftragskiller gegen Krebszellen • Zuckerkrankheit: Impfen gegen Diabetes • Zöliakie: Fatale Darmstörung • HIV: Die Achillesferse des Aidsvirus • Lob der Freundschaft • Langzeitfolgen: Ebolas zweiter Angriff • € 8,90



Technik: Virtuelle Therapie gegen Schmerzen • Antikörper gegen Migräne • Selbstmitgefühl: Sich selbst ein Freund sein • Psychotherapie: Besser leben trotz Pein • Psychotrauma: Schatten der Vergangenheit • € 5,90

Hier bestellen:
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/shop

mitunter den Eintritt in diese Phase, aber was diesen Übergang auslöst, ist unbekannt.

Dahinter stecken vermutlich unterschiedliche Entzündungsprozesse in der weißen sowie der grauen Substanz. Die Schlüsselfrage lautet demnach: Was veranlasst die Immunzellen, in diese verschiedenen Hirnregionen einzudringen und sie zu schädigen? Um das zu klären, verglich die Arbeitsgruppe von Alexander Flügel von der Universität Göttingen bei Ratten die Wanderung von zwei Sorten an T-Zellen: solche, die das Myelin in der weißen Substanz attackieren, und jene, die sich gegen das Protein β-Synuclein richten. Letzteres findet sich in der grauen Substanz und gilt als mögliches Ziel der Immunattacke.

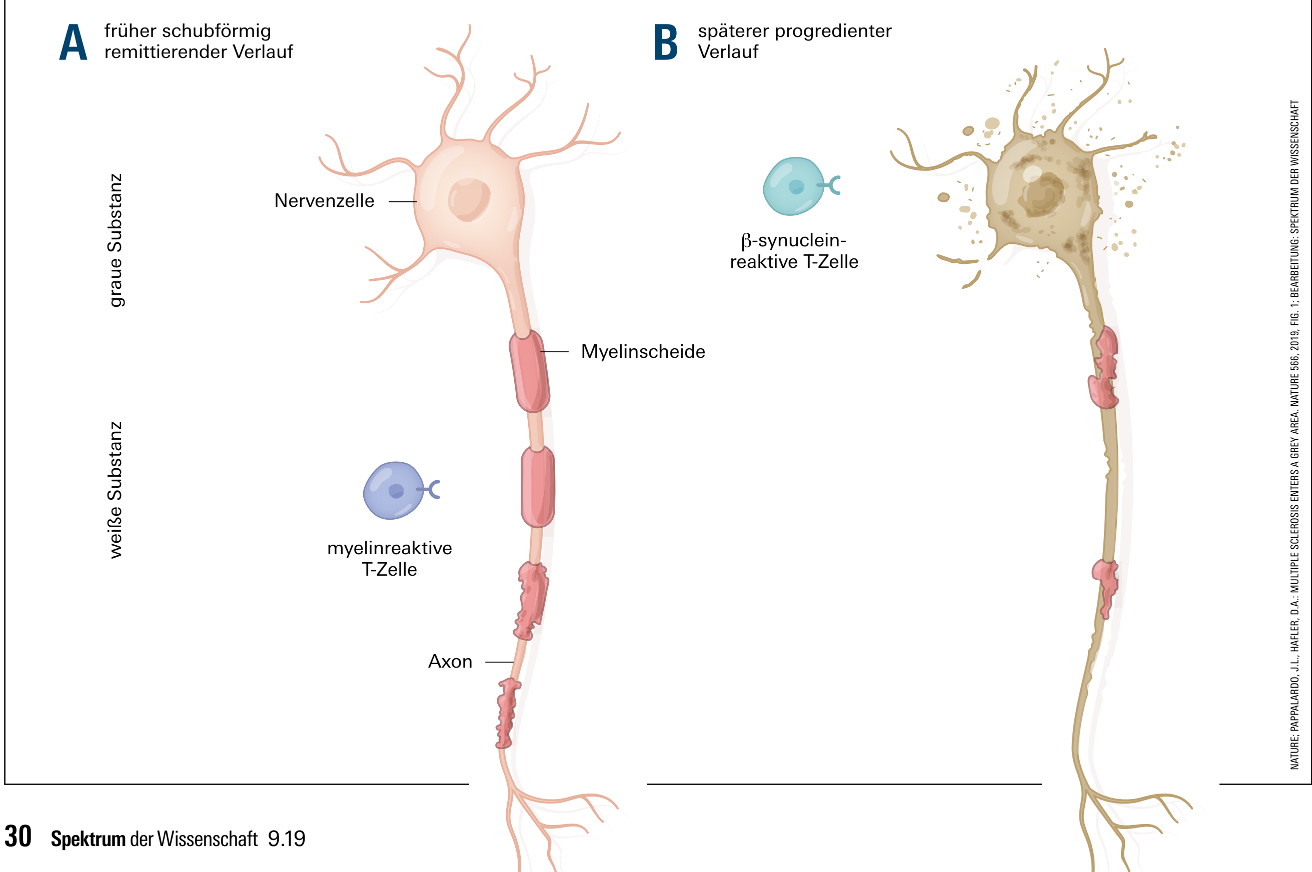
Bislang gingen die Mediziner davon aus, dass die Immunzellen die unterschiedlichen Hirnregionen durch Rezeptoren für entzündungsfördernde Chemokine aufspüren. Das konnten die Göttinger Wissenschaftler allerdings nicht bestätigen. Laut deren Experimenten finden die T-Zellen ihren Weg durch ihre Fähigkeit, spezifisch an ihr Zielprotein zu binden: Myelinspezifische T-Zellen traten im Rattengehirn in der myelinreichen weißen Substanz auf, drangen aber kaum in die graue Substanz vor. Im Gegensatz dazu schädigten T-Zellen, die β-Synuclein angreifen, vor allem die graue Substanz, wo sie Zytokine freigaben und damit die Neurone sowie die sie unterstützenden Gliazellen attackierten (siehe »Zwei Angriffsziele der multiplen Sklerose«, unten). Die Schäden traten hier dauerhaft auf – so wie es in der progredienten Phase der Krankheit zu erwarten ist.

Zusätzlich bestimmten die Forscher die Konzentrationen von myelin- und β-synucleinspezifischen T-Zellen in Blutproben von MS-Patienten. Ergebnis: Menschen mit schubförmig remit-

Zwei Angriffsziele der multiplen Sklerose

In der weißen Substanz des Gehirns liegen die Axone der Neurone, umgeben von einer lipidhaltigen Myelinscheide. Spezifische T-Zellen des Immunsystems attackieren das Myelin. Diese Autoimmunreaktion gilt als Schlüsselprozess in der Frühphase der multiplen Sklerose, der schubförmig remittierenden Verlaufsform (links).

Später kann die Krankheit in die progrediente Form übergehen, bei der sich die körperlichen Behinderungen schleichend verschlimmern. In dieser Phase werden vor allem die Nervenzellkörper zerstört, die den Zellkern beinhalten und in der grauen Hirnsubstanz liegen. Wie ein Team aus Göttingen jetzt anhand von Ratten und Blutproben von Patienten herausfand, scheinen die Zellzerstörungen auf T-Zellen zu beruhen, die das Protein β-Synuclein in der grauen Substanz erkennen (links).



NATURE: PAPPALARDO, J.L., HAFLER, D.A.: MULTIPLE SCLEROSIS ENTERS A GREY AREA. NATURE 566, 2019, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

tierender MS wiesen mehr myelinreaktive T-Zellen auf als gesunde Vergleichspersonen, wohingegen bei Patienten mit progredientem Verlauf mehr gegen β-Synuclein gerichtete Immunzellen auftraten. Am höchsten lag die Konzentration der β-synucleinspezifischen Zellen bei Betroffenen, die schon sehr lange an der Krankheit litten. Demnach scheint tatsächlich β-Synuclein ein zentrales Angriffsziel während des späteren Krankheitsverlaufs zu sein – ausgelöst vermutlich durch einen Prozess namens Epitoperweiterung, bei dem einer ersten spezifischen Immunreaktion eine weitere Attacke gegen andere Proteine folgt.

Das Ausmaß der Schäden in der grauen sowie der weißen Substanz variiert oft bei den jeweiligen Verlaufsformen der Krankheit, was wohl auf den unterschiedlichen Spezifitäten der T-Zellen beruht. Hier könnten künftige Untersuchungen ansetzen. So ließe sich mittels Magnetresonanztomografie herausfinden, ob die Häufigkeit der verschiedenen T-Zellen mit der Lage und dem Ausmaß der Hirnschäden korreliert. Wenn wir mehr über die Immunzellen wüssten, welche die graue Substanz angreifen, könnten wir die progredienten Krankheitsverläufe besser verstehen und damit neue Monitoring- und Behandlungsstrategien entwickeln.

Ähnliche Prozesse bei Parkinson

Die Entdeckung der für β-Synuclein spezifischen T-Zellen bei MS erinnert an eine andere neurodegenerative Krankheit: Im Blut von Parkinsonpatienten, bei denen ebenfalls die graue Substanz geschädigt wird, lässt sich das verwandte Protein α-Synuclein nachweisen. Beide Proteine sind im gesamten Nervensystem weit verbreitet und erfüllen ähnliche Funktionen. Sie treten in den Synapsen zwischen den Nervenzellen auf und regulieren intrazelluläre Transportprozesse. Die Familie der Synuclein-Proteine könnte demnach eine Verbindung zwischen Parkinsonkrankheit und MS darstellen. Generell spielen die Proteine der grauen Substanz bei chronischen neurodegenerativen Erkrankungen wohl eine stärkere Rolle als bislang vermutet.

Wissenschaftler sollten nun genauer untersuchen, wie die Synuclein attackierenden T-Zellen funktionieren und wie man deren Menge mit gezielter Immuntherapie beeinflussen kann. Dadurch ließen sich bisher unbekannte Mechanismen enthüllen, die der MS oder anderen Formen der Neurodegeneration zu Grunde liegen. Und nicht zuletzt könnte man damit die noch fehlenden Tiermodelle für die progrediente multiple Sklerose entwickeln. ◂

Jenna L. Pappalardo forscht als Doktorandin in der Arbeitsgruppe des Neurologen **David A. Hefler** von den Departments of Neurology und Immunobiology der Yale School of Medicine.

QUELLE

Lodygin, D. et al.: β-Synuclein-reactive T cells induce autoimmune CNS grey matter degeneration. Nature 566, 2019

nature
© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 566, S. 465–466, 2019

MAGIC: THE GATHERING
DAS KOMPLEXESTE SPIEL VON ALLEN

Überraschung für algorithmische Spieltheoretiker: Nie hätten sie sich träumen lassen, dass ein Spiel so komplex sein kann. Doch »Magic« überfordert selbst die leistungsfähigsten Rechner mitunter gewaltig.

▶ Wer im September 2018 in Las Vegas war, konnte einer Szene Zeuge werden, die an die beliebte Fernsehserie »The Big Bang Theory« erinnerte: In einem Raum bekämpften sich 24 erwachsene Männer mit bunten Fantasy-Spielkarten, auf denen magische Kreaturen und Zaubersprüche abgebildet sind. Tatsächlich handelte es sich um die jährlich stattfindende »Magic: The Gathering«-Weltmeisterschaft, bei der die Spieler um Preisgelder von insgesamt 300 000 Dollar wetteifern.

Mittlerweile hat das Kartenspiel auch in wissenschaftlicher Hinsicht viele Menschen in seinen Bann gezogen, denn es scheint jahrzehntealte Überzeugungen von Spieltheoretikern über den Haufen zu werfen: Offenbar ist Magic mit seinen vielen Karten, komplizierten Regeln und ausgeklügelten Strategien für Computer eine größere Herausforderung, als Informatiker für möglich gehalten haben.

Das Hauptinteresse von algorithmischen Spieltheoretikern ist es, Gewinnstrategien für laufende Spiele zu berechnen. Je schwerer es einem Computer fällt, den Ausgang einer Partie für optimale Spielzüge vorherzusagen, desto komplexer stufen Informatiker ein Spiel ein. Magic scheint hier im Vergleich mit anderen auf besondere Weise herauszustechen: Wie der Informatiker Alex Churchill aus Cambridge in Großbritannien nun mit Stella Biderman vom Georgia Institute of Technology in Atlanta und Austin Herrick von der University of Pennsylvania in Philadelphia in einer auf ArXiv veröffentlichten Arbeit festgestellt hat, lässt sich der Ausgang eines Magic-Duells nicht immer vorhersagen – damit handelt es sich um das komplexeste aller Spiele.

Um zwischen verschiedenen Schwierigkeitsstufen zu unterscheiden, teilen theoretische Informatiker Probleme in so genannte Komplexitätsklassen ein. Dabei ist entschei-

»Magic: The Gathering« als Turingmaschine

Weil ein Magic-Spiel einer Turingmaschine entspricht, kann man damit auch Matheprobleme lösen. Die Felder des Bands der Turingmaschine entsprechen Bobs grünen und weißen Kreaturen (unten im Bild). Der Abstand zum Kopf (gelb) gibt den Stärke- und Widerstandswert (obere Zahlenwerte), die Buchstaben den Kreaturtyp an.

Matheproblem	Turingmaschine	Magic: The Gathering
2 + 2	STOP	Sieger
$x^2 = 2$; x ist eine natürliche Zahl		unentschieden
Primzahlzwilling $> 10^{500\,000}$	???	???

8/8	7/7	6/6	5/5	4/4	3/3	2/2	3/3	4/4	5/5	6/6	7/7
H	D	A	Z	L	D	K	F	D	L	K	A

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

dend, wie lang ein Computer braucht (wenn er es überhaupt schafft), um eine Aufgabe zu lösen. Möchte man etwa eine Zahl in ihre Primfaktoren zerlegen, also in die Primzahlen, die miteinander multipliziert diese Zahl ergeben, wächst die dafür benötigte Rechendauer exponentiell mit ihrer Größe an. Die gegenteilige Operation, also das Multiplizieren zweier Primfaktoren, gestaltet sich dagegen wesentlich einfacher: Hier nimmt die Rechendauer nach neuesten Untersuchungen bloß mit $n \cdot \log(n)$ zu, wobei n die Anzahl der Stellen beider Faktoren ist.

Für extrem große Zahlen gibt es daher keine effiziente Möglichkeit, sie in ihre Primfaktoren zu zerlegen, während es sehr einfach ist, das Ergebnis zu überprüfen. Solche Probleme sind in der Informatik als »NP-Probleme« bekannt.

Mit dem Schema lässt sich auch die Komplexität eines Spiels bewerten. Zum Beispiel kann ein Computer während einer Partie Schach berechnen, ob und wie die Farbe Weiß noch gewinnen kann. Dazu muss er bloß alle möglichen Spielzüge durchgehen. Das klingt zwar ziemlich aufwändig, allerdings führt das begrenzte Spielbrett dazu, dass ein Rechner diese Aufgabe in kurzer Zeit bewältigen kann. Weil die meisten echten Spiele (das heißt solche, die Menschen wirklich spielen und nicht nur künstlich konstruiert wurden) nicht sehr komplex sind, interessierten sich Informatiker kaum für sie. Tatsächlich gingen Experten bisher davon aus, dass es kein echtes Spiel gibt, dessen Komplexität die Klasse NP erreicht.

Wie Churchill und seine zwei Kollegen nun gezeigt haben, ist das bei Magic aber der Fall. Sie vermuten sogar, dass das Sammelkartenspiel noch komplexer sein könnte. Um zu diesen Schlüssen zu kommen, bedienten sich die Forscher eines gängigen Konzepts der theoretischen Informatik: einer so genannten Turingmaschine. Dieses 1936 von dem britischen Wissenschaftler Alan Turing eingeführte Rechnermodell simuliert die Arbeitsweise klassischer Computer.

Es besteht aus einem Band, das in einzelne Felder unterteilt ist, und einem Kopf, der die Felder ausliest und gegebenenfalls beschreibt. Die Maschine kann das Band nach links oder rechts bewegen, um zu den gewünschten Feldern zu gelangen. Sie repräsentiert damit das, was Mathematiker eine Funktion nennen: Sie wandelt Zahlen nach einer bestimmten, eindeutigen Vorschrift in andere

Zahlen um. Ein typischer Ausschnitt eines Programms für eine Turingmaschine lautet beispielsweise: »Wenn die Maschine im Zustand 3 ist und das Feld die Zahl 0 enthält, dann überschreibe sie mit einer 1, gehe in Zustand 5 über und rücke 4 Felder nach rechts.«

Wird die Turingmaschine anhalten?

Ein Klassiker bei der Auseinandersetzung mit Turingmaschinen ist die Frage, ob eine Maschine bei der Berechnung eines Problems zum Ende gelangt oder endlos weiterläuft – Informatiker sprechen vom Halteproblem. Bereits 1936 hatte Turing bewiesen, dass es keine Möglichkeit gibt, diese Frage allgemein für jeden möglichen Algorithmus zu beantworten.

Churchill und seinem Team gelang es jetzt zu zeigen, dass die Frage nach dem Spielausgang eines Magic-Duells dem Halteproblem entspricht. Das bedeutet, dass es Spielsituationen gibt, in denen ein Computer nicht berechnen kann, wer bei einem optimalen Spiel als Gewinner hervorgeht.

Die Wissenschaftler gelangten zu dem überraschenden Ergebnis, indem sie darlegten, dass Magic: The Gathering die gleichen Funktionen besitzt wie eine Turingmaschine, also »Turing-vollständig« ist, wie Experten sagen. Anders ausgedrückt: Man kann mit Magic eine Turingmaschine simulieren und umgekehrt.

Dazu konstruierten Churchill, Biderman und Herrick eine spezielle Ausgangssituation zwischen zwei Magic-Spielern und identifizierten die möglichen Spielzüge mit den wesentlichen Funktionen einer Turingmaschine: das Auslesen, Beschreiben und Bewegen des Bands. Dadurch besitzt das Spiel sämtliche Eigenschaften des theoretischen Rechnermodells und lässt sich mit den Mitteln der theoretischen Informatik untersuchen.

Die passende Spielsituation bei Magic: The Gathering auszuwählen, gestaltete sich jedoch schwierig. Denn sie musste einerseits genügend komplizierte Elemente des Spiels enthalten, um eine Turingmaschine zu simulieren, andererseits sollte sie dabei aber simpel genug bleiben, damit man die möglichen Spielzüge noch überblickt. Immerhin gibt es mehr als 20 000 verschiedene Magic-Karten, die jeweils unterschiedliche Funktionen erfüllen. Zudem enthalten einige von ihnen freiwillige Aktionen, die dem Spieler strategischen Freiraum lassen, was sich nur schwer simulieren lässt. Churchill und seine Kollegen bezogen deshalb nur Karten mit ein, die einen eindeutigen Effekt haben. In der kreierten Spielsituation – die durchaus in einem realen Turnier entstehen kann – gibt es daher nur noch erzwungene Züge; die Spieler haben keinerlei Entscheidungsfreiheit.

Vor dem Beginn eines Magic-Duells wählt ein Spieler aus seiner Sammlung 40 Karten gezielt aus. Diese Selektion aus dem riesigen Fundus der verfügbaren Karten und die damit einhergehenden Kombinationsmöglichkeiten führen zu der außergewöhnlichen Komplexität des Spiels. Hat der Spieler eine Auswahl getroffen, mischt er seine Karten sorgfältig und nimmt anschließend sieben davon auf die Hand. Die übrigen bilden seinen Nachziehstapel.

Unter den Karten befinden sich solche mit Kreaturen, die den Gegner angreifen, aber auch Zauber und Artefakte. Nach jeder Runde zieht man eine Karte von seinem Stapel. Sobald dieser leer ist und der betreffende Spieler eine Karte aufnehmen soll, hat dieser verloren. Ansonsten besiegt man den Gegenüber, indem man seine Lebenspunkte durch gezielte Attacken auf null reduziert.

In dem von Churchill und seinen Kollegen konstruierten Spiel treten Alice und Bob gegeneinander an. Bob ist in der Situation, dass er keine Karten auf der Hand hat und sein Nachziehstapel leer ist – er steht also kurz vor der Niederlage. Dafür kontrolliert er alle Kreaturen, die auf dem Tisch liegen. Alice kann daher nur versuchen, Bobs Kreaturen mit den Karten aus ihrem Stapel anzugreifen.

Die Kreaturen auf dem Tisch entsprechen in diesem Modell dem Band der Turingmaschine: Auf jedem Feld befindet sich eine Kreatur, deren Stärke- und Widerstandswert jeweils angeben, wie viel Schaden sie anrichtet

WAS IST LOS IN DER WELT DER WISSENSCHAFT?

Die Antwort hören Sie in den **Spektrum**-Podcasts.
Jetzt neu mit ausführlichen Beiträgen unserer Redakteure.

Spektrum.de/podcast



UNSPLASH / BARRETT WARD (https://unsplash.com/photos/0IMpOaXtOCg)

und was sie einstecken kann. Zudem verfügen einige Karten bei Magic über eine oder mehrere von fünf verschiedenen »magischen« Farben. In dem von dem Informatiker erdachten Spiel tauchen bloß weiße oder grüne Kreaturen mit jeweils gleichen Stärke- und Widerstandswerten (zum Beispiel 2/2 oder 7/7) auf.

Das Band ist im Anfangszustand so angeordnet, dass der Lesekopf auf der schwächsten Kreatur (2/2) ruht; rechts davon befinden sich der Stärke nach alle weißen Kreaturen und analog dazu links alle grünen. Eine weiße Kreatur mit den Werten 5/5 steht demnach auf dem dritten Feld rechts vom Kopf. Die Art der Kreatur ist durch ein Symbol auf dem Feld vermerkt.

Moderlungen-Wiederbeleber lässt Kleriker wiederauferstehen

Die verschiedenen Funktionen der Turingmaschine werden durch das Spielen von Alices Karten initiiert: Um das Band der Turingmaschine nach rechts oder links zu bewegen, muss Alice eine Karte legen, die allen Kreaturen einer bestimmten Farbe Schaden zufügen. Doch was, wenn dabei eine Kreatur stirbt? Churchill und seine Kollegen haben für diesen Fall vorgesorgt: Eine von Bobs Karten ist der »Moderlungen-Wiederbeleber«, der eine tote Kreatur durch eine neue der gleichen Stärke ersetzt. Damit ist auch geklärt, wie der Kopf der Turingmaschine ein Feld ausliest und neu beschreibt: nämlich indem Alice eine Kreatur vernichtet und Bob sie daraufhin wiederbelebt.

Entscheidend für den gesamten Vorgang ist die Karte »künstliche Entwicklung«, die es einem Spieler erlaubt, die Aktionen anderer Karten abzuändern. Während der Moderlungen-Wiederbeleber beispielsweise nur Kleriker als Zombies wiederauferstehen lässt, kann man mit der künstlichen Entwicklung den Zombie durch eine beliebige andere Kreatur austauschen. Genau diese Fähigkeit zeichnet Magic: The Gathering Churchill zufolge aus: »Damit ein Spiel die gleiche Komplexität wie Magic aufweist, muss ein Spieler es während einer Partie kontrollieren oder programmieren können, wie es etwa durch die künstliche Entwicklung möglich ist.«

Mit dieser Kartenauswahl hat das Spiel zwischen Alice und Bob alle Fähigkeiten einer Turingmaschine. »Wählt man sein liebstes Matheproblem aus, kann man durch geeignete Wahl der Karten eine Magic-Spielsituation kreieren, die dieses Problem berechnet«, erklärt Stella Biderman, Koautorin der Arbeit. Das ist allerdings sehr aufwändig: Zuerst muss man die Aufgabe in die Sprache einer Turingmaschine übersetzen, was schon ziemlich kompliziert ist, und danach die richtige Auswahl und Anordnung der Magic-Karten finden, die dem Problem entspricht. Hat man jedoch die richtige Ausgangssituation entdeckt, muss man Alice und Bob nur noch loslegen lassen; ihre erzwungenen Spielzüge entsprechen dann den einzelnen Berechnungsschritten. Sobald das Spiel zwischen ihnen beendet ist, lässt sich die Lösung der Aufgabe auslesen.

Churchill und sein Team haben das Spiel so konstruiert, dass Bob gar nicht gewinnen kann. Daher hält die Turingmaschine erst an, wenn Alice siegt, ansonsten läuft sie ewig weiter. In echten Magic-Spielen können solche Situationen tatsächlich entstehen. Es gibt sogar eine Regel, wonach im Fall von sich immer wieder wiederholenden Zügen eine Partie unentschieden ausgeht.

Insgesamt können im Spiel zwischen Alice und Bob also drei verschiedene Situationen eintreten: Die Karten entsprechen einem Problem, das eine Turingmaschine lösen kann, beispielsweise der Aufgabe, 2 + 2 zu berechnen. In so einem Fall wird Alice das Spiel gewinnen.

Andererseits könnte das Spiel ein unlösbares Problem darstellen, wie »Berechne die natürliche Zahl, für die $x^2 = 2$ ergibt«. Da eine solche Zahl nicht existiert, wird die Turingmaschine ewig weiterlaufen; das Spiel geht unentschieden aus.

Es gibt aber noch eine dritte Möglichkeit: Die Karten könnten für etwas stehen, von dem man nicht weiß, ob es lösbar ist oder nicht. Ein Beispiel dafür wäre »Berechne ein Paar Primzahlzwillinge (also zwei Primzahlen mit einer Differenz von 2, wie 5 und 7 oder 11 und 13), die größer sind als $10^{500\,000}$«. Weil Mathematiker bisher nicht wissen, ob es Primzahlzwillinge dieser Größe gibt, ist es unklar, ob die Turingmaschine jemals halten wird oder für immer weiterläuft.

Wenn ein Computer also den Spielausgang zwischen Alice und Bob vorhersagen soll, muss er das Halteproblem für Turingmaschinen lösen. Für viele Situationen, wie in den ersten beiden zuvor genannten Beispielen, ist das kein Problem. Doch es gibt auch Spiele, in denen der Ausgang unklar ist, wie im letzten Fall. Insgesamt kann daher kein allgemeiner Algorithmus vorhersagen, wie, ob und wann das Spiel zwischen Alice und Bob endet – und das, obwohl jeder Spielzug der beiden erzwungen ist. Der Ausgang einer Partie hängt nur davon ab, welche Kreaturen Bob anfangs beherrscht und in welcher Reihenfolge Alice ihre Karten zieht.

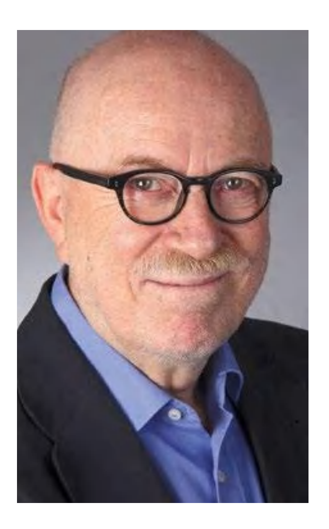
Die Forscher gehen davon aus, dass nicht bloß ihre speziell konstruierte Spielsituation in eine solche Sackgasse führt, sondern dass dies auch in beliebigen Magic-Partien der Fall sein dürfte. Insgesamt erreiche das Spiel mindestens die Komplexitätsstufe NP, schreiben die Autoren. Um zu prüfen, ob es vielleicht sogar noch komplexer ist, muss man allerdings eine andere Herangehensweise als klassische Turingmaschinen wählen.

Dennoch ist die aktuelle Veröffentlichung aus spieltheoretischer Sicht erstaunlich, selbst wenn es Magic-Spieler wahrscheinlich weniger überraschen mag: Schon lange rühmen sich viele von ihnen damit, dass sie ein extrem kompliziertes Spiel beherrschen. Nun können sie auch offiziell von sich behaupten, das komplexeste Spiel der Welt zu meistern. ◂

Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLE

Churchill, A. et al.: Magic: The Gathering is Turing complete. ArXiv 1904.09828, 2019



SPRINGERS EINWÜRFE
DAS AUTO – EIN NACHRUF

Seit seiner Erfindung legte das Kraftfahrzeug einen beispiellosen Siegeszug hin. Doch allmählich neigt sich die Ära des privaten Autobesitzes dem Ende zu.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

spektrum.de/artikel/1661436

Erwachsen werden, das hieß in meiner Jugend: den Führerschein machen und mit dem ersten selbst verdienten Geld (plus einer elterlichen Starthilfe) einen fahrbaren Untersatz kaufen. Seither habe ich im Lauf der Zeit fünf oder sechs gebrauchte Pkws besessen, lebe aber nun schon jahrzehntelang autofrei. In meiner mittelgroßen Stadt komme ich mit Fahrrad, Carsharing, Bus und Taxi gut zurecht – und spare obendrein eine Menge.

So beobachte ich aus persönlicher Distanz eher gelassen, wie sich das Image des Autos wandelt: vom Vehikel der individuellen Freiheit zum ökologischen Problem. Dabei ist mir bewusst, dass Pendler und Landbewohner bis auf Weiteres mangels Alternativen nicht ohne ein oder sogar zwei Autos auskommen können. Deshalb geht der Wandel nicht glimpflich ab, sondern wird von heftigen Auseinandersetzungen begleitet. Ein Beispiel bietet der Aufstand der französischen »Gelbwesten« gegen die Einführung einer Ökosteuer auf Diesel und Benzin.

Wie ein kritischer Rückblick auf die Geschichte des Individualverkehrs offenbart, schuf das Auto schon immer gewaltige, jedoch lange ignorierte Probleme. Für die USA, wo das massengefertigte Ford-T-Modell zu Beginn des 20. Jahrhunderts erstmals Millionen Bürger zu privaten Autobesitzern machte, hat dies der Techniksoziologe Lee Vinsel nacherzählt (»Moving Violations: Automobiles, Experts, and Regulations in the United States«, Johns Hopkins University Press, Baltimore 2019).

Vinsel schildert einen technologischen Durchmarsch, dessen Blutzoll zunächst als unvermeidlich hingenommen wurde. Bereits 1909 töteten die vergleichsweise wenigen und langsamen Knatterkutschen mehr als 1000 Amerikaner. In der Folge stieg die Zahl stetig und steil, bis in den 1970er Jahren jährlich 50 000 Menschen auf US-Straßen ums Leben kamen – Jahr für Jahr fast so viele Amerikaner wie im gesamten Vietnamkrieg. Erst danach begannen öffentliche Regulierungsmaßnahmen die Opferzahlen allmählich zu senken. Im Verlauf spielte ab Mitte der 1960er Jahre ein Bewusstseinswandel eine Rolle, der von den Universitäten ausging und sich in Bezug auf das Auto im Konsumentenanwalt Ralph Nader personifizierte. In Deutschland wurde 1976 die Gurtpflicht eingeführt, 1984 der Abgaskatalysator.

Trotz alledem sterben heute jährlich weltweit rund 1,35 Millionen Menschen auf den Straßen. Im Jahr 2018 gab es in Deutschland »nur« 3265 Verkehrstote, was nicht als gesellschaftlicher Skandal empfunden wird, sondern als tolerierbarer Preis einer »freien Fahrt für freie Bürger«. Dabei ist die Verkehrssicherheit eine Frage des Standpunkts. Die neuerdings sehr beliebten Sport Utility Vehicles (SUVs) sind für die Insassen zwar sicherer als normale Kleinwagen, für Fußgänger aber tödlicher.

Überhaupt ist das SUV, ein übertrieben motorisierter Sprit- und Platzfresser, oft mit für normale Straßen sinnlosem Vierradantrieb, rational betrachtet ein Unding. Wie mir scheint, drückt sich darin eine trotzige Endzeitstimmung der Autowelt aus. Während halbherzig gepredigt wird, man solle bitte der Umwelt zuliebe – trotz zwiespältiger Ökobilanz – auf kurzreichweitige und kostspielige Elektroautos umsteigen, dient man dem Kunden noch schnell ein protziges SUV an, denn wer weiß, wie lange das weitergeht.

Ein starkes Indiz für die heraufziehende Katerstimmung in puncto Privatauto erblicke ich in der hemmungslos eskapistischen Werbung. Sie zeigt den eigenen Wagen als irreales Lustobjekt, als fliegenden Teppich zur Flucht aus dem Alltag, als Verwirklichung des Traums von einsamer Fahrt durch menschenleere Landschaften – kurz, als das exakte Gegenteil der real im Stau steckenden und sich von einer roten Ampel zur nächsten hangelnden Fortbewegungskrücke.



GORODENKOFF / GETTY IMAGES / ISTOCK

GORODENKOFF / GETTY IMAGES / ISTOCK

MEDIZIN

REPARATUR IN DER GEBÄRMUTTER

Einige genetisch bedingte Krankheiten schädigen bereits den Fötus im Mutterleib. Für Abhilfe könnte eine vorgeburtliche Gentherapie sorgen.

Sarah Deweerdt ist Wissenschaftsjournalistin in Seattle, Washington.

spektrum.de/artikel/1661438



SERIE

Gentherapie

Erbkrankheiten schon bei vorgeburtlichen Tests zu erkennen, bietet die Chance, sie bereits am Fötus zu behandeln und so beispielsweise Entwicklungsstörungen vorzubeugen.

Im Juli 2018 berichteten Forscher, sie hätten eine tödliche Hirnerkrankung bei Mäusen mit Hilfe der Gentherapie stoppen können – und zwar bevor die Tiere geboren wurden. Die Nager trugen eine defekte Version des Gens *GBA*; dieses enthält den Bauplan eines Enzyms, das bestimmte Lipidverbindungen namens Glucocerebroside abbaut. Fehlt das Enzym, reichern sich diese Moleküle im Gehirn an und verursachen dort irreparable Schäden. Tiere, die von dem Gendefekt betroffen sind, sterben normalerweise binnen 14 Tagen nach der Geburt. Ihre Krankheit entspricht dem Gaucher-Syndrom beim Menschen – deshalb dienen die Mäuse als Tiermodelle, um dieses Leiden zu erforschen. Das Gaucher-Syndrom kann unterschiedlich schwer verlaufen, daher unterteilen die Ärzte es in drei Typen. Beim Typ II werden die betroffenen Kinder meist nicht älter als zwei Jahre.

In dem Versuch mit *GBA*-defekten Mäusen spritzten die Wissenschaftler etwa zur Halbzeit der Schwangerschaft in das Gehirn der Mäuseföten bestimmte Viren ein, die eine intakte Version des Gens *GBA* enthielten. Die so behandelten Tiere kamen ohne Komplikationen auf die Welt und lebten mindestens viereinhalb Monate lang, ohne Anzeichen eines Hirnschadens zu zeigen. »Das entspricht einer überaus bedeutsamen Lebensverlängerung«, betont Jerry Chan, Spezialist für vorgeburtliche Medizin an der Duke-NUS Medical School (Singapur), einer der beteiligten Autoren. Darüber hinaus behandelten die Wissenschaftler auch gesunde Makakenföten mit ihrer gentherapeutischen Methode – und demonstrierten damit, dass sich bei diesen Primaten, die dem Menschen hinsichtlich Größe und Physiologie deutlich mehr ähneln als Mäuse, ein entsprechender Eingriff vornehmen lässt, ohne dass schwere Nebenwirkungen auftreten. »Wir haben versucht, experimentell möglichst aussagekräftig und zugleich ethisch einwandfrei einen Weg aufzuzeigen, wie sich unser Gentherapie-Ansatz in die klinische Anwendung am Menschen übertragen lässt«, sagt Simon Waddington, Gentherapieforscher am University College London und Leiter der Studie.

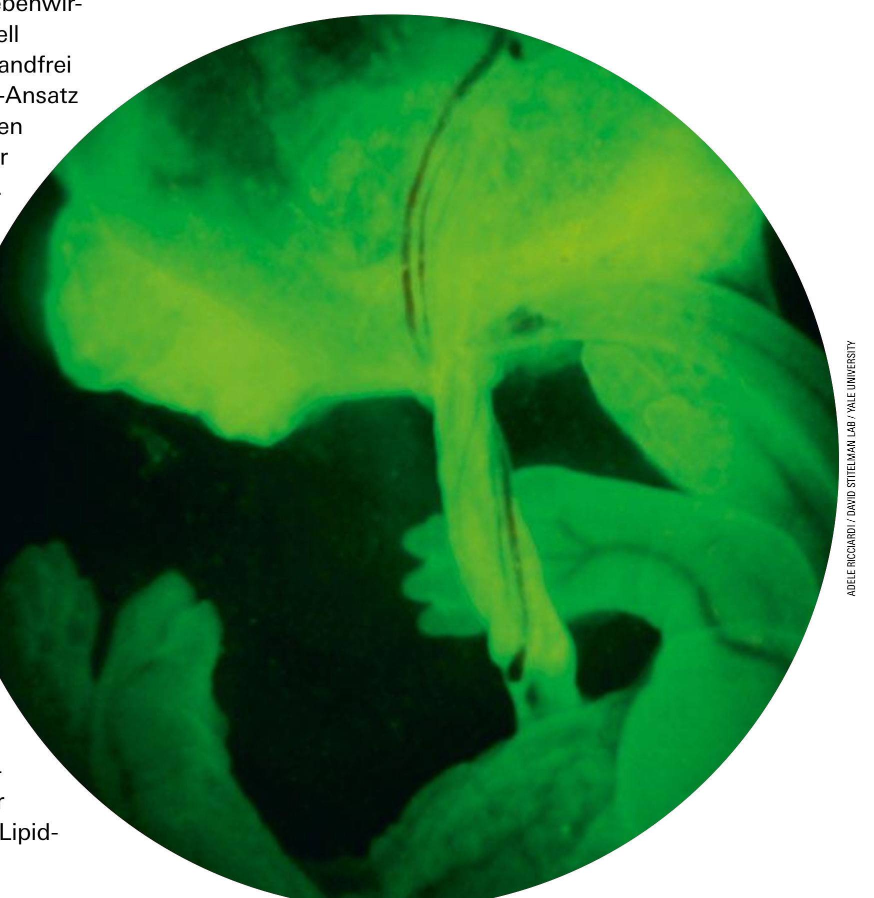
Auch andere Wissenschaftler, die sich mit vorgeburtlichen (pränatalen) Gentherapien befassen, sehen in diesen Ergebnissen einen großen Schritt nach vorn und halten sie für ein starkes Indiz dafür, dass entsprechende Eingriffe beim Menschen funktionieren könnten. »Mäuse- und Makakenexperimente miteinander kombiniert zu haben, macht diese Studie überaus interessant«, meint etwa Bill Peranteau, Spezialist für vorgeburtliche Chirurgie am Children's Hospital of Philadelphia in Pennsylvania.

Die technischen Hürden, Sicherheitsanforderungen und ethischen Probleme von vorgeburtlichen Gentherapien sind enorm. Doch könnten solche Eingriffe der beste Weg sein, um einige schwere Erbkrankheiten zu behandeln – und vielleicht der einzige, auf dem sich eine dauerhafte Heilung erzielen lässt. Das Gaucher-Syndrom gehört zu jenen Leiden, die am ehesten für eine derartige Therapie in Frage kommen. Denn die Lipidverbindungen, die auf Grund des angeborenen Stoffwechseldefekts nicht abgebaut werden, reichern sich bereits im Hirngewebe des Fötus an, was schon vor der Geburt zu unumkehrbaren Hirnschäden führen kann. Nach Möglichkeit sollte es gar nicht dazu kommen.

Bei vielen anderen Erbkrankheiten prägen sich die Symptome zwar erst im Säuglings- oder Kleinkindalter aus. Doch auch hier können pränatale Gentherapien den Betroffenen möglicherweise viel besser helfen, als wenn die Mediziner nach der Geburt eingreifen. »Wir versuchen, die Entwicklungsprozesse des Fötus auszunutzen, um die Behandlung effektiver zu machen und ihre Erfolgsaussichten zu erhöhen«, erklärt Peranteau, der vorgeburtliche genetische Eingriffe bei Stoffwechselerkrankungen der Leber an Tiermodellen testet.

Während sich der Fötus im Mutterleib entwickelt, ist seine Blut-Hirn-Schranke noch nicht ausgereift und daher teilweise durchlässig. In späteren Entwicklungsstadien hingegen verhindert sie weitgehend, dass Moleküle aus dem Blut ins Hirngewebe übertreten. Daher lassen sich therapeutische Gene bei Ungeborenen relativ leicht ins Zentralnervensystem einschleusen. Im Jahr 2011 wiesen Simon Waddington und sein Team nach, dass eine virale Genfähre namens AAV2/9 viel verlässlicher in das Gehirn von Mäuseföten vordringt als in das von bereits geborenen Tieren.

Mit Hilfe fluoreszierender Nanopartikel lassen sich Föten, ihre Nabelschnur und die Plazenta im Mutterleib sichtbar machen, hier gezeigt am Beispiel einer Maus.



ADELE RICCIARDI / DAVID STITELMAN LAB / YALE UNIVERSITY

Ein weiterer Vorteil vorgeburtlicher Eingriffe besteht darin, dass das Immunsystem zu dem Zeitpunkt noch nicht vollständig ausgeprägt ist. Genfähren – egal ob Viren oder andere Vehikel – lösen daher nicht so oft unerwünschte Abstoßungsreaktionen aus. Außerdem entwickelt der fetale Körper mit größerer Wahrscheinlichkeit eine Immuntoleranz gegen die Genfähre, weshalb eine erneute gentherapeutische Behandlung, sollte sie im späteren Leben nötig werden, mehr Aussicht auf Erfolg hat. Zudem ist bei einem fetalen Immunsystem die Gefahr nicht so groß, dass es die intakten Proteine zerstört, die der Organismus infolge des gentherapeutischen Eingriffs produziert, da es diese Moleküle eher akzeptiert als das Immunsystem eines bereits geborenen oder gar ausgewachsenen Individuums.

Das schnelle Wachstum und die rasche Entwicklung des Fötus erhöhen die Effektivität der Gentherapie. Denn weil sich ständig zahlreiche Körperzellen teilen, besteht eine größere Chance für das Erbgut des therapeutischen Virus, ins zelluläre Genom eingebaut zu werden. Wegen der fortlaufenden Teilungen wächst auch die Menge jener Zellen, die das therapeutische Genmaterial erfolgreich aufgenommen haben, während der weiteren Schwangerschaft permanent an. Außerdem ist es für eine Heilung häufig wichtig, dass die injizierten Gene in Stamm- oder zumindest Vorläuferzellen gelangen – und diese sind im ungeborenen Organismus in größerer Zahl vorhanden sowie besser zugänglich.

Ein weiterer Aspekt ist die Körpermasse: Ein menschliches Neugeborenes bringt ungefähr 3,5 Kilogramm auf die Waage, ein 20 Wochen alter Fötus dagegen nur etwa 300 Gramm. Eine gegebene Dosis des gentherapeutischen Arzneistoffs hat auf den letzteren Organismus allein schon deshalb mehr Wirkung, weil sie sich auf weniger Gewebe verteilt. Das ist ein großer Vorteil, weil entsprechende Arzneistoffe oft teuer und schwierig herzustellen sind.

Es sind immer mindestens zwei Menschen auf einmal betroffen

Eine solche Therapie stellt die Mediziner allerdings vor ganz besonders große Herausforderungen. Jeder vorgeburtliche Eingriff ist komplex, da er stets zwei Menschen betrifft: die Mutter und das Kind. »Man muss immer beide berücksichtigen – und außerdem an jene Kinder denken, die die Mutter möglicherweise noch bekommen wird«, sagt Anna David, Gentherapie-Forscherin und Spezialistin für vorgeburtliche Medizin am University College London.

Das Prinzip einer pränatalen Gentherapie ist recht einfach. Die Ärzte spritzen den Arzneistoff entweder in die Nabelschnur, ins Fruchtwasser oder gelegentlich auch direkt ins Körpergewebe des Fötus – oft unter Ultraschallkontrolle. Die Techniken hierbei sind vergleichbar mit bereits etablierten Methoden, etwa der Punktion der Fruchtblase, der Plazenta-Punktion oder der Bluttransfusion durch die Nabelvene. »Diese Verfahren sind ziemlich sicher in der Anwendung«, sagt David. Jedoch ließen sich Infektionen oder unabsichtlich ausgelöste Früh- oder Fehlgeburten bei ihnen nicht vollständig ausschließen. »Alles in allem«, so David, »ist es wohl wesentlich sicherer, die Gentherapie erst nach der Geburt des Kinds anzuwenden, wenn das Risiko eines Schwangerschaftsabbruchs nicht mehr besteht und der Mutter keine direkte Gefahr mehr davon droht.«

Unabhängig davon, wann der Eingriff erfolgt, gibt es bei jeder Gentherapie bestimmte Gefahren – etwa, dass die virale Genfähre eine Immunreaktion auslöst oder ihr Erbgut so ins Genom einbaut, dass die Zelle entartet und Krebs entsteht. Einige dieser Risiken sind bei vorgeburtlicher Behandlung freilich um ein Vielfaches größer. Gelangt das Genvehikel beispielsweise in den Blutkreislauf der Mutter, könnte es bei ihr eine gefährliche Immunreaktion provozieren oder sogar ihre eigenen Zellen verändern. Beim Ungeborenen wiederum könnte der Eingriff, besonders wenn er in einer frühen Entwicklungsphase erfolgt, auch Keimbahnzellen modifizieren, die später die Geschlechtszellen hervorbringen. In diesem Fall würden die Veränderungen des Erbguts an die Nachkommen weitergegeben – ein ethisch höchst problematisches Szenario. Weiterhin könnte die Behandlung den vorgeburtlichen Entwicklungsprozess stören, indem sie den fetalen Organismus dazu bringt, Gene am falschen Ort oder zur falschen Zeit zu aktivieren. Das hätte unter Umständen unumkehrbare Folgen, etwa die Fehlbildung von Organen.

Wenn sich bei vorgeburtlichen Untersuchungen herausstellt, dass ein Kind von einem folgenreichen Gendefekt betroffen ist, müssen Eltern sich oft entscheiden, ob sie das Kind bekommen möchten oder die Schwangerschaft abbrechen wollen. Der Reiz der pränatalen Gentherapie liegt darin, dass sie den Betroffenen einen dritten Weg eröffnet. Allerdings wirft genau das auch Probleme auf: Was, wenn die Gentherapie nicht anschlägt und die Eltern mit einem schwer kranken Kind zurücklässt, auf das sie sich nicht vorbereitet haben und für das sie sich nicht entschieden hätten? Ebenso könnte ein nur teilweise erfolgreicher Eingriff das Leid der Beteiligten erhöhen, indem er weitere Beeinträchtigungen nach sich zieht, die möglicherweise lebenslang anhalten.

Wegen dieser Bedenken äußern sich Mediziner nur sehr vorsichtig dazu, welche Aussichten auf eine pränatale

AUF EINEN BLICK
HILFE FÜR DAS UNGEBORENE

1 Manche Erbkrankheiten schädigen das Kind bereits im Mutterleib. Forscher hoffen, sie mit vorgeburtlichen Gentherapien behandeln zu können.

2 Solche pränatalen Eingriffe haben mehrere Vorteile gegenüber nachgeburtlichen Behandlungen, stellen die Mediziner aber auch vor ganz besondere Herausforderungen.

3 Tierversuche haben gezeigt, dass vorgeburtliche Gentherapien grundsätzlich erfolgreich sein können. Unklar ist, inwieweit sich die Erfolge auf den Menschen übertragen lassen.

Gentherapie beim Menschen bestehen. »Wenn es eine adäquate Behandlungsmöglichkeit nach der Geburt gibt, werden sich die Ärzte für sie entscheiden statt für Eingriffe am Fötus«, meint Peranteau. Dennoch befassen sich Wissenschaftler schon beinahe genauso lange mit prä- wie mit postnatalen Anwendungen. Die ersten Machbarkeitsstudien, die im Tierversuch demonstrierten, dass sich Erbanlagen bereits vor der Geburt in einen Organismus einschleusen lassen, wurden 1995 publiziert – nur wenige Jahre nach der ersten erfolgreichen Gentherapie am Menschen. Viele Forscher interessierte daran nicht nur die Möglichkeit, Krankheiten im Mutterleib zu behandeln, sondern auch die Chance, einige Schwierigkeiten nachgeburtlicher Eingriffe ins Genom zu umgehen. Charles Coutelle vom Imperial College London beispielsweise sah sich Mitte der 1990er Jahre von der »Enttäuschung über die damalige Effizienz der Gentherapie« veranlasst, in dieses Gebiet einzusteigen.

Coutelle war an einer der ersten Studien beteiligt, in denen Mediziner das Genom von Patienten zu verändern suchten, um Mukoviszidose zu behandeln. Diese tödlich verlaufende Erbkrankheit führt zu Funktionsstörungen im Atemapparat, in der Bauchspeicheldrüse, in der Leber, im Darm und in den Geschlechtsorganen. Es erwies sich jedoch als schwierig, die Lungen der Patienten gentherapeutisch zu behandeln, da schon bei kleinen Kindern die Atemwege mit zähem Schleim und vernarbtem Gewebe verstopft sind; erschwerend kommen Fehlfunktionen des Immunsystems hinzu. Coutelle war überzeugt, es müsse einfacher sein, Mukoviszidose-Betroffene im Mutterleib zu therapieren, wo das Fruchtwasser noch frei durch ihre Lungen fließt.

Erfolgreiche Behandlung der Bluterkrankheit im Mutterleib

Die Wissenschaftler um Coutelle verbrachten einige Jahre damit, Gentherapien im Fetalstadium an Labormäusen zu perfektionieren und dabei herauszufinden, welche Genfähren sich am besten für die vorgeburtliche Behandlung von Mukoviszidose und anderen schweren Krankheiten eignen. Der erste große Erfolg – eine Leistung, die bis heute als methodischer Durchbruch gilt – stellte sich 2004 ein. In jenem Jahr gelang es einem Team um Coutelle und Waddington, die Bluterkrankheit Hämophilie B schon bei Mäuseföten im Mutterleib erfolgreich zu behandeln. Hierfür spritzten sie den Tieren bestimmte Viren mit dem intakten genetischen Bauplan für das Protein »Faktor IX«, das an der Blutgerinnung mitwirkt.

Wenig später musste das Team aber umsatteln, weil sich unerwartete Probleme abzeichneten. Eine der verwendeten Genfähren heilte die Nager nur vorübergehend von der Bluterkrankheit; eine andere sorgte zwar für eine länger anhaltende Wirkung, erhöhte aber das Risiko für Lebertumoren. Noch wichtiger war jedoch, dass die Methoden zur nachgeburtlichen Gentherapie dieses Leidens einen plötzlichen Entwicklungssprung machten. »Sobald sich ein solches postnatales Verfahren etabliert hat, das hinreichend gut funktioniert, gibt es in der Regel keinen Grund mehr, riskante Eingriffe am Fötus vorzunehmen«, erklärt Coutelle.

Das Team musste umsatteln, weil sich unerwartete Probleme abzeichneten

Waddington sah sich nach einem neuen Betätigungsfeld um und verlegte sich auf Erbkrankheiten, die zu einem noch früheren Entwicklungszeitpunkt schwere Schäden verursachen. Dies brachte ihn auf das Gaucher-Syndrom, eine Stoffwechselstörung aus der großen Gruppe der lysosomalen Speicherkrankheiten, zu denen das Tay-Sachs-Syndrom und die Niemann-Pick-Krankheit gehören (siehe **Spektrum** Mai 2017, S. 40). All diese Leiden schädigen bereits das Ungeborene im Mutterleib und sind daher gute Kandidaten für die Anwendung einer pränatalen Gentherapie.

Andere Wissenschaftler halten nach wie vor auch die Bluterkrankheit für geeignet dafür. Forscher um Graça Almeida-Porada und Christopher Porada von der Wake Forest University in Winston-Salem (North Carolina) experimentieren mit Schafen, die als Tiermodelle für Hämophilie A dienen. Dieser angeborene Gerinnungsdefekt macht einen Großteil der Bluterkrankheiten beim Menschen aus; seine nachgeburtliche Behandlung per Gentherapie ist aber sehr kompliziert. Denn bei Hämophilie A besteht ein Mangel an dem Blutgerinnungsfaktor VIII, der starke Immunreaktionen auslösen kann. Viele Patienten, die von dieser Variante der Bluterkrankheit betroffen sind, haben Antikörper gegen Faktor VIII entwickelt, was es kompliziert und teuer macht, ihnen das Protein im Zuge einer Ersatztherapie zu verabreichen. »Ihnen den genetischen Bauplan des Eiweißes noch vor der Geburt einzuschleusen, könnte zu einer Immuntoleranz dagegen führen, so dass die Betroffenen erst gar keine Abwehrreaktion ausprägen«, sagt Almeida-Porada. Ihr Team beabsichtigt, Hämophilie A in Schafföten zu behandeln, indem es dem mütterlichen Fruchtwasser Stammzellen entnimmt, darin das defekte Gen für Faktor VIII korrigiert und die so veränderten Zellen dem Fötus überträgt.

Im Juni 2018 berichteten Forscher um Adele S. Ricciardi von der Yale University in New Haven (Connecticut, USA), bei Mäuseföten erfolgreich Beta-Thalassämie behandelt zu haben, eine angeborene Erkrankung des Blut bildenden Systems. Verursacht wird sie von Mutationen, die zu einer fehlerhaften Synthese des Proteins beta-Globin führen, einer Untereinheit des Hämoglobins. Infolge des Defekts transportiert Hämoglobin weniger Sauerstoff durch den Körper, was Müdigkeit, Wachstumsstörungen und Organschäden nach sich zieht. Das Team wählte einen gentherapeutischen Ansatz und nutzte dabei Nanopartikel, die Peptid-Nukleinsäuren (PNA) enthielten. PNA ähneln Nukleinsäuren wie RNA oder DNA, doch ist in ihnen das Zucker-Phosphat-Rückgrat durch Peptide ersetzt. Ricciardi und ihre Kollegen wendeten PNA an, in denen bioverträgliche Polymermoleküle die intakte Sequenz des beta-Globin-Gens umhüllten. »Eine einzige Injektion dieser Konstrukte in die

Gebärmutter schwangerer Mäuse, die Jungtiere mit Beta-Thalassämie austrugen, führte dazu, dass die Jungtiere nach der Geburt deutlich weniger Symptome der Krankheit aufwiesen«, berichtet Peter Glazer, Genetiker und Radioonkologe an der Yale University und Mitautor der Studie.

PNA nutzen die zelleigenen DNA-Reparaturmechanismen, um die intakte Sequenz des jeweils gewünschten Gens ins zelluläre Erbgut zu übertragen. Damit umgehen sie möglicherweise einige Sicherheitsprobleme, die mit Viren als Genvehikeln verbunden sind. Zudem scheinen sie bei vorgeburtlichen Behandlungen recht effektiv zu wirken. »In dem sich rasch entwickelnden Fötus sind die Zellen empfänglicher für entsprechende Eingriffe ins Erbgut«, so Glazer. »Das könnte etwas damit zu tun haben, dass ihre DNA-Reparatur wegen der hohen Teilungsrate auf Hochtouren läuft.«

Gentherapien, die auf PNA basieren und sich gegen Thalassämien oder auch die Sichelzellenanämie (eine weitere erbliche Blutkrankheit) richten, könnten laut Glazer zunächst bei Kindern klinisch getestet werden, dann bei Säuglingen und schließlich bei Föten in der Gebärmutter. Unklar ist, wie schnell dies geschehen könnte. »Im Fall der Thalassämien dürfte wohl zuerst ein stammzellenbasierter Ansatz in die klinische Praxis gelangen«, vermutet Jerry Chan. Denn Stammzell- oder Knochenmarkstransplantationen seien besser erprobt als Gentherapien, speziell in Fragen der Anwendungssicherheit.

Vorgeburtliche Eingriffe nur bei entsprechenden Diagnosen

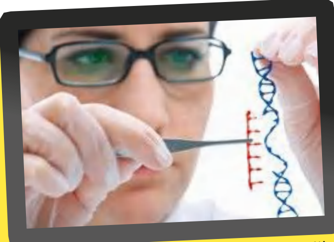
Selbst wenn es die vorgeburtliche Gentherapie nicht in die Klinik schafft, wäre sie immer noch ein nützliches Forschungswerkzeug, betont Marianne Carlon, Gentherapie-Forscherin an der Katholischen Universität Löwen in Belgien. Im Fall der Mukoviszidose habe sich das bereits gezeigt. Carlon und ihr Team haben herausgefunden, dass sich therapeutische Genfähren in den Lungen von Schweineföten wesentlich gleichmäßiger verteilen als in den Lungen neugeborener Schweine. Es stellt sich die Frage, ob das für den Therapieerfolg bedeutsam ist – oder ob sich die Lungenschäden, die mit dieser Erkrankung einhergehen, auch vermeiden lassen, wenn die Behandlung lediglich die großen und mittleren Atemwege erreicht. Experimentelle vorgeburtliche Gentherapien am Tiermodell könnten klären helfen, auf welche Zelltypen in den Atemwegen die Behandlung abzielen muss, um Mukoviszidose effektiv zu bekämpfen. Das wäre insbesondere dann wichtig, wenn die Gentherapie bei Neugeborenen nicht hinreichend gut funktioniert, so Carlon.

Pränatale Gentherapien gegen Mukoviszidose werden wahrscheinlich schon deshalb nicht in die klinische Praxis kommen, weil ein vorgeburtliches Screening zur Früherkennung dieser Krankheit nicht üblich ist. Die Diagnose erfolgt meist erst nach der Geburt. Ohnehin kommen solche Eingriffe überhaupt nur dann in Frage, wenn Ärzte die Erkrankung nicht nur vor der Geburt feststellen, sondern auch mit hinreichender Sicherheit belegen können, dass ihr Schweregrad einen Eingriff am Fötus rechtfertigt. Das sind überaus komplexe Fragen, die sich nicht bei allen angeborenen Komplikationen ausreichend genau beantworten lassen.

Relativ gute Praxischancen haben pränatale Gentherapien gegen eine Erkrankung, die ausschließlich im Mutterleib diagnostiziert wird, da sie lediglich Föten vor der Geburt betrifft. Bei rund drei Prozent aller Schwangerschaften tritt eine Entwicklungsstörung namens »intrauterine Wachstumsretardierung« (IUGR) auf; die Säuglinge kommen dann mit einem gefährlich niedrigen Körpergewicht zur Welt. Die IUGR geht nicht auf Schäden in einzelnen Genen zurück, sondern entsteht unter anderem, wenn sich – aus noch unklaren Gründen – die Gebärmutterarterien während der Schwangerschaft nicht richtig umorganisieren und es demzufolge sowohl der Plazenta als auch dem Fötus an Blut und Nährstoffen mangelt.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/gentherapie**



GERNOT KRAUTBERGER / FOTOLIA

Anna David hat gezeigt, dass sich eine IUGR zumindest bei Schafen lindern lässt, indem man in die mütterliche Seite der Plazenta ein Gen mit der Bauanleitung des Wachstumsfaktors VEGF einschleust, der die Bildung von Blutgefäßen anregt. »Das ist eine gentherapeutische Behandlung der Mutter, um in ihrem Organismus eine Fehlfunktion zu beheben, die dem Fötus Probleme bereitet«, erklärt David. Die Körperzellen stellen VEGF nach diesem Eingriff zwar nur etwa eine Woche lang her – das reicht aber, um Gefäßneubildungen in der Plazenta anzustoßen. David hat nun die Zulassung dafür beantragt, eine entsprechende klinische Studie mit schwangeren Frauen durchzuführen. »Die IUGR gehört zu den wichtigsten Ursachen für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes im späteren Leben der betroffenen Kinder«, schildert die Forscherin. »Deshalb wünschen sich ihre Eltern dringend eine Behandlung, die es derzeit aber nicht gibt. Die vorgeburtliche Gentherapie bietet hier hoffentlich einen Ausweg.« ◂

QUELLEN

Carr, D.J. et al.: Peri- and postnatal effects of prenatal adenoviral VEGF gene therapy in growth-restricted sheep. Biology of Reproduction 94, 2016

Massaro, G. et al.: Fetal gene therapy for neurodegenerative disease of infants. Nature Medicine 24, 2018

Ricciardi, A.S. et al.: In utero nanoparticle delivery for site-specific genome editing. Nature Communications 9, 2018

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 564, S. 6–8, 2018

STRATOSPHÄRISCHE WINDE
RICHTUNGSWECHSEL IN GROSSER HÖHE

In der Stratosphäre wehen heftige Winde, die regelmäßig ihre Richtung wechseln. Offenbar setzen tropische Stürme diesen Kreislauf in Gang. Inzwischen haben Computersimulationen das bestätigt – und könnten künftig Auswirkungen auf das Klima vorhersagen.





Louis-Alexandre Couston (links) ist Wissenschaftler beim British Antarctic Survey, **Benjamin Favier** (Mitte) forscht an der Aix-Marseille Université. **Michael Le Bars** ist wissenschaftlicher Leiter des CNRS am Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE), ebenfalls an der Aix-Marseille Université.

▸▸ spektrum.de/artikel/1661440

ALEKSANDARGEORGIEV / GETTY IMAGES / ISTOCK

AUF EINEN BLICK
CHAOTISCHE ORDNUNG

1 Lange Zeit dachten Meteorologen, die Stratosphäre sei ruhig. Tatsächlich wehen dort aber starke Winde, die alle 14 Monate ihre Richtung umkehren.

2 Die regelmäßige Schwingung gab Forschern lange Rätsel auf. Offenbar lösen die vergleichsweise schwachen Stürme der Tropen diesen unerwarteten Zyklus aus.

3 Forscher versuchen nun zu verstehen, wie diese chaotisch auftretenden Unwetter in der untersten Schicht der Atmosphäre einen so regelmäßigen Effekt in der darüberliegenden Schicht verursachen können.

Die Stratosphäre erstreckt sich in 16 bis 50 Kilometer Höhe. Auch wenn sie verglichen mit der darunterliegenden Troposphäre ruhig ist, durchkämmen sie starke Winde, die in regelmäßigen Abständen ihre Richtung umkehren.

ALEKSANDARGEORGIEV / GETTY IMAGES / ISTOCK

Als 1883 der indonesische Vulkan Krakatau ausbrach, schleuderte er Asche mit solcher Wucht in die Atmosphäre, dass sie eine Höhe von bis zu 30 Kilometern erreichte. Forscher beobachteten damals, wie die Staubwolke die Erde entlang des Äquators von Ost nach West innerhalb von bloß zwei Wochen umkreiste. Sie schlossen daraus, dass die Stratosphäre starken Winden ausgesetzt ist, die mit mehr als 100 Kilometern pro Stunde wehen. Doch als der deutsche Meteorologe Arthur Berson 25 Jahre später die äquatorialen Winde mit Wetterballons untersuchte, war die Überraschung groß. Sie bewegten sich in die entgegengesetzte Richtung, von West nach Ost!

Nach Jahren intensiver Beobachtungen stellte sich heraus, dass die Stratosphäre offenbar einem periodischen Phänomen unterliegt, der so genannten quasi-zweijährigen Schwingung: Alle 14 Monate kehrt sich die Bewegung der stratosphärischen Luftmassen über dem Äquator um.

Was führt zu diesem unerwarteten Kreislauf, der nichts mit den sonstigen jährlichen Wetterzyklen zu tun hat? Forscher vermuten, dass chaotische Prozesse wie tropische Stürme dafür verantwortlich sind. Diese vergleichsweise kleinen Störungen könnten ausreichen, um äquatoriale Winde in einer Höhe von 16 bis 35 Kilometern zu erzeugen, die sich mal nach Westen und mal nach Osten ausbreiten.

Die Erklärung erinnert an die berühmte Metapher für chaotische Systeme, in denen bereits das Flattern eines Schmetterlings einen Hurrikan am anderen Ende der Erde verursachen könne. Genauso scheinen lokal auftretende tropische Stürme globale Winde zu verursachen, die unseren Planeten vollständig umkreisen.

So plausibel die Theorie auch klingt, so schwer ist es, sie zu belegen. Wissenschaftler entwickelten etliche Computersimulationen und führten zahlreiche Experimente im Labor durch, um die quasi-zweijährige Schwingung nachzu-

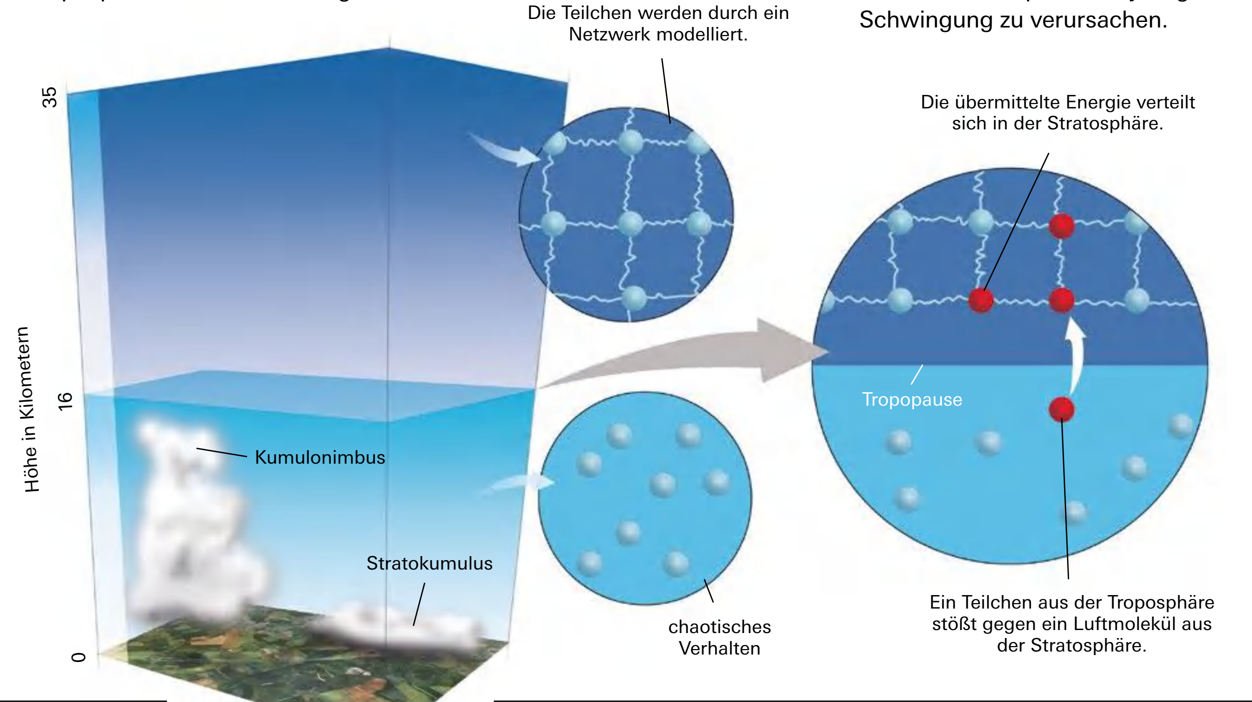
Von der Troposphäre in die Stratosphäre

Der untere Teil der Atmosphäre teilt sich in zwei Zonen auf. Die Troposphäre erstreckt sich vom Boden bis zur Tropopause in einer Höhe von etwa 16 Kilometern, wo die Stratosphäre beginnt und in einer Höhe von etwa 50 Kilometern an der Stratopause endet.

Mit zunehmender Höhe kühlt die Troposphäre ab, wodurch sich die vom Boden aufsteigende warme Luft mit der absinkenden kalten Luft durchmischt. Das macht die Troposphäre zu einem unruhigen Bereich, in dem verschiedene Wetterphänomene entstehen. Die Luftmoleküle bewegen sich chaotisch durch die Schicht hindurch.

In der Stratosphäre spielt sich dagegen ein völlig anderes Szenario ab. Weil sich Treibhausgase in einer Höhe von etwa 50 Kilometern sammeln und ihre Umgebung erwärmen, steigt die Temperatur nach oben hin an. Dadurch entstehen stabile waagerechte Lagen, in denen die Luft der Dichte nach geordnet ist. Konvektion findet in der Stratosphäre daher nicht statt. Dadurch lassen sich die Luftpartikel als Netzwerk modellieren, das durch Federn verbunden ist.

Trifft ein Teilchen aus der Troposphäre (rot) auf die Tropopause, dann gibt es einen Teil seiner Energie an die Stratosphäre ab. Diese Störung breitet sich auf die benachbarten Luftpartikel in Form von Wellen aus, die genügend Energie liefern, um die quasi-zweijährige Schwingung zu verursachen.



RAPHAEL QUERUEL / POUR LA SCIENCE MÄRZ 2019

bilden. Doch beide Ansätze stellten sie vor Herausforderungen, weil dabei sowohl Effekte auf kleiner (tropische Stürme) als auch auf großer Skala (stratosphärische Winde) involviert sind. Unserem Team ist es nun gelungen, die periodische Schwingung in einem rechnerbasierten Modell zu beobachten. Wir hoffen, die stratosphärischen Winde durch unser Computerprogramm künftig besser nachvollziehen und ihre Auswirkungen auf das Weltklima genauer untersuchen zu können.

Bevor man sich der quasi-zweijährigen Schwingung widmet, muss man jedoch verstehen, warum oberhalb von 16 Kilometern Höhe überhaupt so starke Winde wehen. Denn lange Zeit waren Experten überzeugt, dass die Stratosphäre im Vergleich zur turbulenten Troposphäre ruhig ist.

Die verschiedenen atmosphärischen Schichten unterscheiden sich stark voneinander (siehe »Von der Troposphäre in die Stratosphäre«, links). Zuunterst befindet sich die Troposphäre, die sich bis zu einer Höhe von etwa 16 Kilometern, der Tropopause, erstreckt. In ihr finden die meisten Wetterphänomene statt, einschließlich starker Stürme oder Gewitter. Direkt darüber beginnt die Stratosphäre, die an der Stratopause in einer Höhe von etwa 50 Kilometern endet. Im obersten Bereich dieser Schicht sammeln sich Treibhausgase wie Ozon, welche die Energie der ultravioletten Strahlung aus dem Weltraum auffangen und in längere Wellenlängen umwandeln. Deshalb wird die Stratosphäre nach oben hin immer wärmer, während es in der Troposphäre andersherum ist.

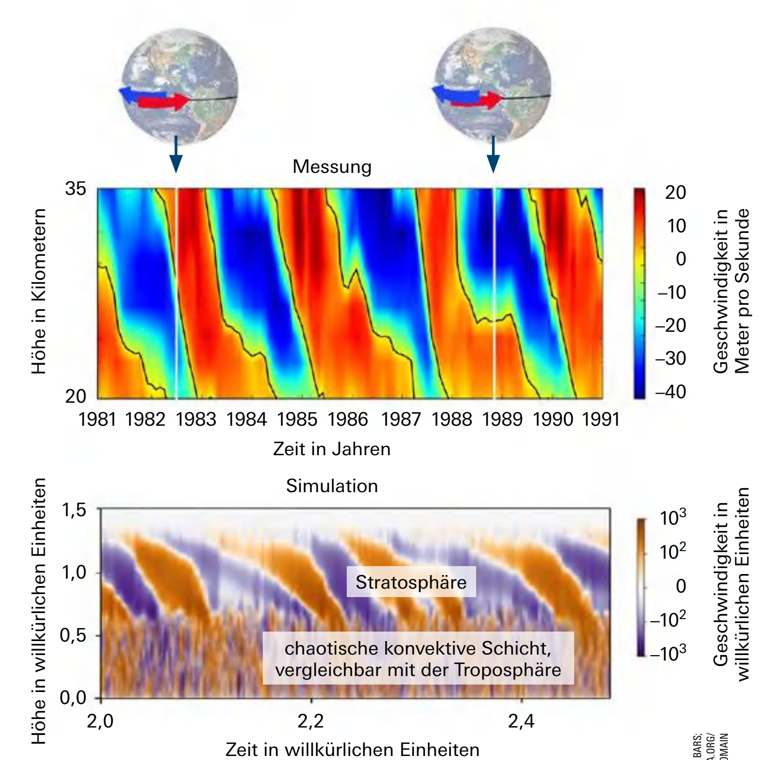
In der Troposphäre steigt die warme Luft vom Boden nach oben, während sich kühle Partikel an ihr vorbei nach unten drücken – was zu Turbulenzen führt. In der Stratosphäre sind die wärmeren Luftmassen dagegen in den höheren Lagen angesiedelt, so dass Konvektion dort nicht stattfindet. Deshalb gingen Forscher lange davon aus, dass die zweite atmosphärische Schicht keine Auswirkungen auf das Weltwetter hat.

Der erste Eindruck trügt

Der Vulkanausbruch im 19. Jahrhundert belehrte sie aber eines Besseren. Die Überraschung wurde noch größer, als der US-Amerikaner Richard Reed und sein englischer Kollege Robert Ebdon 1961 unabhängig voneinander nachwiesen, dass es nicht nur heftige Winde hoch oben in der Atmosphäre gibt, sondern dass sie sich auch noch alle 14 Monate umkehren.

Wie sich herausstellte, ähnelt die Stratosphäre in ihrer Struktur einem Blätterteig. Sie besteht aus vielen übereinandergeschichteten Lagen verschiedener Dichte. Daher bewegt sich die Luft in jeder Lage mit einer anderen Geschwindigkeit (siehe Abbildungen oben). Wie Messungen ergaben, wechseln zuerst die obersten Luftmassen ihre Ausbreitungsrichtung, was eine Art Dominoeffekt auslöst: Nach und nach kehren sich auch alle darunter befindlichen Winde um.

Die stratosphärischen Winde breiten sich nicht auf dem ganzen Planeten aus. In Regionen über zwölf Grad nördlicher und südlicher Breite bremst die Corioliskraft die Luftmassen ab. Dennoch beeinflussen die stratosphärischen Winde das Wetter weltweit: So wirken sie sich beispiels-



In der Stratosphäre hoch über dem Äquator folgt die Windrichtung einem 28-monatigen Zyklus. Messungen über zehn Jahre (oben) veranschaulichen dieses Phänomen. Mit einer Computersimulation erstellten die Autoren ein vereinfachtes Modell der Atmosphäre (unten), um die quasi-zweijährige Schwingung besser zu verstehen.

ERDKUGELN UND SIMULATION: L.A. COUSTON, B. FAVIER & M. LE BARS; MESSUNG: MORN, MIT DATEN DER FU BERLIN (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:QBO_CYCLE_OBSERVED.SVG) / PUBLIC DOMAIN

weise auf nordamerikanische Hurrikans, Monsunzyklen, den europäischen Winter und die Ozonschicht aus.

Um zu verstehen, wie die quasi-zweijährige Schwingung im Detail mit verschiedenen Klimaphänomenen zusammenhängt, muss man herausfinden, wodurch sie entsteht. In den 1950er Jahren klapperten Meteorologen alle möglichen Kandidaten ab, die solche starken Winde hoch oben in der Atmosphäre erzeugen könnten: Gezeiten, Veränderungen der Land- und Meerestemperaturen oder die schwankende Aktivität der Sonne. Doch alle Wege führten in die Irre. Die Wissenschaftler sahen sich daher gezwungen, umzudenken. Anstatt sich bloß auf großflächige Phänomene zu konzentrieren, zogen sie nun auch kleinere Effekte als Ursache in Betracht.

Und tatsächlich deuteten Beobachtungen und theoretische Modelle in den späten 1960er Jahren darauf hin, dass turbulente Strömungen aus der Troposphäre, hervorgerufen durch Stürme, die atmosphärischen Wellen in der Stratosphäre erzeugen. Diese periodischen Störungen sind nicht turbulent, sondern erinnern an eine dreidimensionale Version von Wellen auf einer Wasseroberfläche, die sich sowohl waagerecht als auch senkrecht ausbreiten.

Diese Erkenntnis überraschte Forscher zunächst. Schließlich ist ein einzelnes Unwetter viel zu schwach, um die Stratosphäre direkt zu beeinflussen. Betrachtet man aber alle Stürme zusammen, erzeugen sie ein Wellenpaket, das stark genug ist, um stratosphärische Winde auszulösen.

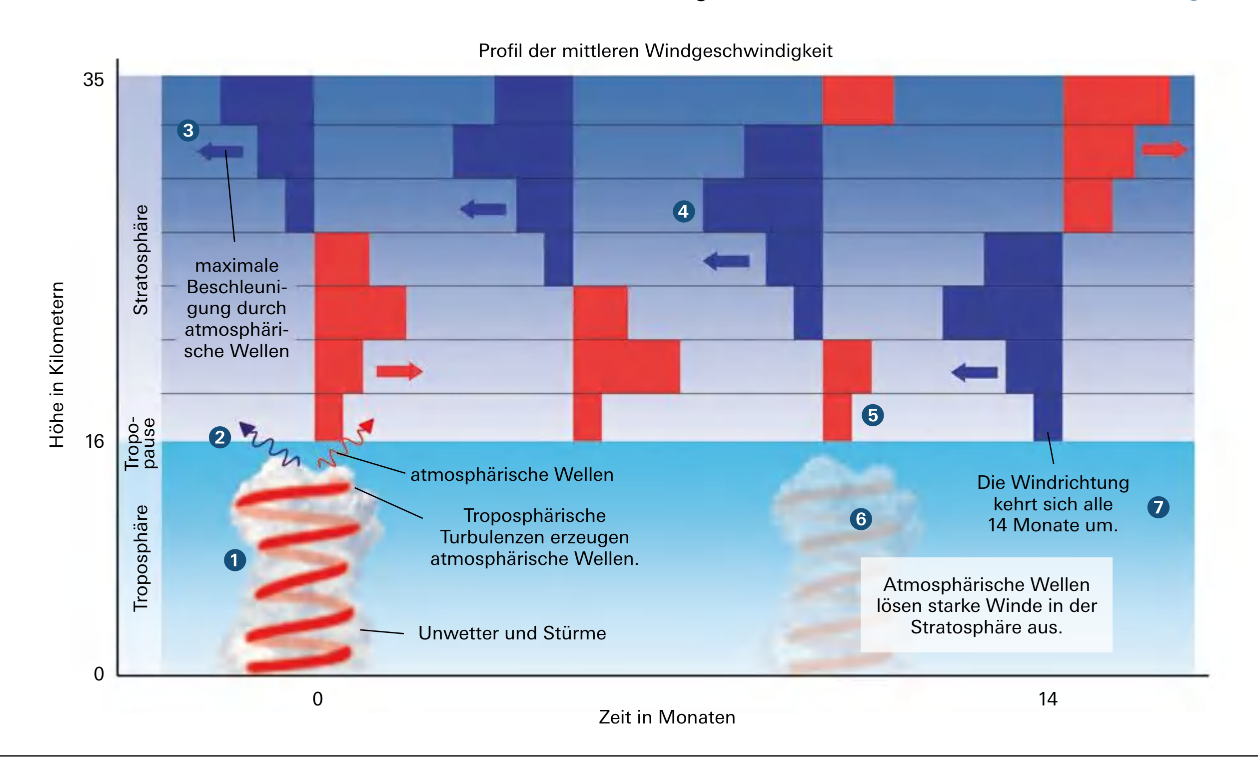
Ein Modell der quasi-zweijährigen Schwingung

Stürme in der Troposphäre ❶ sind die treibende Kraft hinter der quasi-zweijährigen Schwingung. Aus diesen Turbulenzen entstehen atmosphärische Wellen, die sich nach oben hin ❷ in alle Richtungen ausbreiten (blau und rot).

Die Wellen übertragen ihre Energie auf die stratosphärischen Winde, die dadurch schneller werden ❸ (eine »blaue« Welle gibt ihre Energie an »blaue« Winde ab, während eine »rote« Welle »rote« Winde antreibt).

Die Wellen verlieren mit zunehmender Höhe an Energie, so dass sie Winde in niedrigen Schichten stärker beschleunigen. Die unteren Lagen nehmen daher schneller an Geschwindigkeit zu, wodurch es so wirkt, als würden die Winde mit der Zeit nach unten sinken ❹.

An der Tropopause dämpfen Turbulenzen die Winde jedoch, bis sie ganz verschwinden ❺. Trotz der unregelmäßigen Natur der Stürme ❻ führen sie zu einem stabilen periodischen Prozess, der sich alle 28 Monate wiederholt ❼.



RAPHAEL QUERUEL / POUR LA SCIENCE MÄRZ 2019

Damit war das erste Rätsel geklärt. Nun mussten Meteorologen noch herausfinden, warum sich die Winde in einem regelmäßigen Rhythmus umkehren. Eine mögliche Erklärung lieferten die US-Amerikaner Richard Lindzen und James Holton Ende der 1960er Jahre. Sie mutmaßten, dass die atmosphärischen Wellen die Stratosphäre nicht einfach nur durchqueren, sondern ihre Energie unterwegs verteilen und die Luftmassen dabei mit sich ziehen.

Auf den ersten Blick würde man allerdings erwarten, dass sich der Effekt im Mittel ausgleicht, so dass gar kein Wind entsteht. Schließlich gibt es durchschnittlich genauso viele tropische Stürme, die von Ost nach West verlaufen, wie umgekehrt. Aber dieses vermeintliche Gleichgewicht ist instabil.

Man kann sich das Phänomen analog zu Wellen an der Wasseroberfläche vorstellen: Verlaufen sie entlang eines entgegengerichteten Stroms, passiert nicht besonders viel, sie fließen ungehindert darüber hinweg. Doch wenn die Strömung in Richtung der Welle verläuft, fängt diese an zu brechen und überträgt ihre Energie an die Strömung, wodurch sie sie verstärkt. In der Atmosphäre ist der Prozess gleich. Sobald ein noch so kleiner stratosphärischer Wind weht, geben gleichgerichtete atmosphärische Wellen ihre Energie ab, während entgegengerichtete Wellen weiter in die Atmosphäre emporsteigen. Geht man also von zwei entgegengesetzten Wellen aus, wird die in Richtung eines Winds wirkende Welle ihre Energie schnell los, während die andere erst in höheren Lagen einen entgegengesetzten Wind erzeugt.

Häufig haben die Wellen den Großteil ihrer Energie schon abgegeben, bevor sie die Höhe erreichen, in der ein Wind am schnellsten weht. Daher beschleunigen sie die unteren Lagen der Stratosphäre mehr als die oberen. An der Tropopause ist allerdings Schluss, denn die dort herrschenden Turbulenzen bremsen die Winde vollständig ab. Dieses Wechselspiel aus verstärkenden und dämpfenden Effekten führt dazu, dass sich die Windrichtung in der Stratosphäre regelmäßig umkehrt (siehe »Ein Modell der quasi-zweijährigen Schwingung«, oben).

Fast zehn Jahre nach den ersten theoretischen Beschreibungen ist es Alan Plumb und Angus McEwan von der University of Melbourne 1978 erstmals gelungen, die quasizweijährige Schwingung im Labor nachzuahmen. Um die verschiedenen Lagen der Stratosphäre zu modellieren, nutzten die Forscher einen zylindrischen Behälter mit einer Kochsalzlösung, die nach oben hin immer weniger konzentriert wurde. Eine vibrierende, flexible Membran am Boden des Zylinders erzeugte Wellen, die denen in der Atmosphäre ähneln. Mit diesem Aufbau beobachteten sie, wie Strömungen entstehen, die sich in regelmäßigen Zeitabständen umdrehen.

Benoît Semin von der École normale supérieure in Paris wiederholte 2018 zusammen mit seinen Kollegen das australische Experiment, um die quasi-zweijährige Schwingung auch quantitativ nachzuweisen. In ihrem nur wenige Dezimeter messenden Wassertank erzeugten die Forscher das periodische Phänomen in angepasstem Maßstab: Als sie Wellenpakete im Abstand von etwa 15 bis 30 Sekunden (was einigen zehn Minuten in der echten Stratosphäre entspricht) abwechselnd in unterschiedliche Richtungen aussandten, entstand eine Strömung, die sich erst nach einem viel längeren Zeitraum von etwa einer Stunde (zirka 28 Monate in der Stratosphäre) umkehrte.

Chaotische Stürme als Auslöser

Diese Versuche bestätigten die Erklärung von Lindzen und Holton: Offenbar verursachen tropische Stürme die quasizweijährige Schwingung. Das stellt Wissenschaftler vor die nächste Aufgabe. Weil das theoretische Modell die tropischen Stürme nicht explizit mitmodelliert, lässt sich damit keine Vorhersage treffen. Tatsächlich kann die genaue Periode der quasi-zweijährigen Schwingung schwanken, was unvorhersehbare Folgen für das Weltklima hat.

Beispielsweise hatte niemand damit gerechnet, dass das regelmäßige Phänomen im Februar 2016 aussetzen würde. Damals begann sich der westlich gerichtete stratosphärische Wind wie üblich nach etwas mehr als einem Jahr umzukehren – doch dieser Prozess wurde durch einen erneut westwärts wehenden Wind gestoppt. Zum ersten Mal seit den ersten Aufzeichnungen vor mehr als 60 Jahren wurde der periodische Zyklus unterbrochen. Die Ursache dafür ist bis heute unbekannt, Forscher vermuten aber, dass die globale Erwärmung damit zusammenhängt.

Um das zu klären, braucht man ein realistisches Modell, das auch tropische Stürme miteinbezieht. Ein solches zu schaffen, ist allerdings sehr kompliziert, weil sich die troposphärischen Unwetter auf völlig anderen Skalen abspielen als die dadurch entstehende quasi-zweijährige Schwingung (siehe »Ordnung in multiskaligen Systemen«, rechts). Während tropische Stürme bloß mehrere Stunden oder einige Tage andauern, weht der dadurch verursachte stratosphärische Wind mehr als ein Jahr lang in eine Richtung. Zudem erstrecken sich die Unwetter in der Troposphäre über wenige bis zu mehrere hundert Kilometer, wohingegen die quasi-zweijährige Schwingung ein globales Phänomen ist, das über mehr als 40 000 Kilometer verläuft. Das macht es rechnerisch sehr aufwändig, ein solches System zu untersuchen.

Wegen dieser extremen Größenverhältnisse vereinfachen Forscher das Problem. Globale Zirkulationsmodelle (englisch: global circulation models, GCMs), die die Klimaentwicklung simulieren, sind extrem grobkörnig und können daher Stürme und atmosphärische Wellen nicht auflösen (siehe »Wie Wissenschaftler das Klima modellieren«, S. 48). Um ihre Auswirkungen dennoch zu berücksichtigen, fügen Forscher feste Parameter in die Modelle ein, mit Werten, die zu den Beobachtungen passen. Allerdings sind Stürme chaotisch, und ihre schwankende Natur spiegelt sich in den Simulationen kaum wider, was die Modelle ungenau macht.

Weil die quasi-zweijährige Schwingung das Wetter auf der ganzen Welt beeinflusst, möchten wir sie besser verstehen und Unregelmäßigkeiten vorhersehen. Am Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE) in Marseille hat unser Team eine Simulation entwickelt, die auch die chaotische Dynamik der tropischen Stürme mit einbezieht. Dazu erstellten wir ein extrem simples computergestütztes Modell: eine rechteckige Box, die von unten erwärmt und von oben gekühlt wird. Die dabei entstehenden Strömungen beschreiben wir durch die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide.

Ordnung in multiskaligen Systemen

Rührt man einen Kaffee mit einem Löffel um, lässt sich problemlos vorhersagen, wie die Strömung in der Tasse aussehen wird. Der Grund dafür ist, dass sich alles auf der gleichen räumlichen Skala abspielt. Der Löffel ist etwa genauso groß wie die Tasse, ebenso wie der entstehende Strudel.

Leider ist nicht alles in der Natur so einfach. Möchte man beispielsweise die Strömungen in einem großen Becken vorhersagen, in dem 100 Personen schwimmen, gestaltet sich das sehr schwierig. Jeder Schwimmer bringt durch seine Bewegung ein bisschen Chaos in das System. Zudem sind verschiedene Größenordnungen beteiligt: Die Bewegung der Arme und Beine einer einzelnen Person erscheinen winzig verglichen mit der Größe des gesamten Beckens.

Ähnlich verhält es sich mit der quasi-zweijährigen Schwingung, die sich über die gesamte Erde erstreckt, aber durch viele kleine Störungen entsteht. Auf den ersten Blick würde man erwarten, dass sich die winzigen unregelmäßigen Schwankungen im Mittel aufheben und keine Gesamtbewegung erzeugen. Die stratosphärischen Winde bringen jedoch Ordnung in das Chaos. Sie können dabei noch so schwach sein – sobald ein solcher Wind weht, genügt seine Kraft, um die Störungen zu ordnen. Diese geben ihre Energie wiederum an den Wind ab, wodurch sie ihn verstärken.

Wie Wissenschaftler das Klima modellieren

Trotz vieler technischer Fortschritte bleibt die Wettervorhersage eine schwierige Aufgabe. Noch komplexer wird es allerdings, wenn man das Erdklima für die nächsten 100 Jahre berechnen möchte.

Um das Klima zu beschreiben, muss man ein System mit extrem komplizierten Gleichungen lösen. Bei solchen computergestützten Berechnungen wird die Erdatmosphäre in kleine Einheiten unterteilt, die jeweils Informationen über Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Druckverhältnisse und so weiter enthalten. Dabei wird angenommen, dass innerhalb einer Einheit alle klimatischen Variablen konstant sind. Je kleiner die Einheiten gewählt werden, desto genauer ist das Modell. Das Gleiche gilt für die zeitliche Entwicklung des Systems: Man unterteilt auch die Zeitachse in kurze Intervalle, die zwei aufeinander folgende Zustände des Modells trennen.

Allerdings lassen sich in Klimamodellen nicht beliebig viele Raum- und Zeitpunkte simulieren. Selbst die besten Supercomputer, mit tausenden gleichzeitig rechnenden Prozessoren, sind auf Zellen von etwa 100 Kilometer Länge und einem Kilometer Höhe beschränkt. Um mehrere dutzend oder gar einige hundert Jahre zu untersuchen, kann der Zustand des Systems bestenfalls einige Male am Tag aktualisiert werden.

Die Modelle können daher keine schwachen oder kurzzeitigen Stürme simulieren, auch wenn diese die globale Luftzirkulation beeinflussen. Stattdessen führen Wissenschaftler einzelne Terme in die Gleichungen ein, die solche chaotischen Störungen berücksichtigen. Beispielsweise kann man eine Beschleunigung hinzufügen, welche die stratosphärischen Luftmassen antreibt.

Damit Meteorologen zuverlässige Vorhersagen produzieren können, müssen sie der Beschleunigung einen passenden Zahlenwert zuweisen. Der lässt sich über theoretische Modelle, Laborexperimente und andere Computersimulationen ermitteln. Diese sind zwar nicht so komplex wie Klimamodelle, lösen dafür aber auch Phänomene auf kleiner Skala auf.

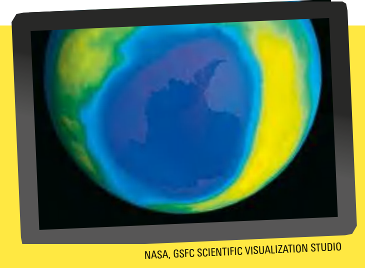
In ähnlichen Ansätzen nehmen Forscher meist an, dass die Dichte mit wachsender Temperatur abnimmt, wodurch das von unten erwärmte Fluid nach oben steigt. Das ist aber nicht immer so. Unterhalb einer bestimmten Temperatur kann sich der Effekt umkehren. Bei Wasser tritt das zwischen 0 und 4 Grad Celsius ein, weshalb es bei 4 Grad die höchste Dichte besitzt.

Da wir diese Anomalie in unserem Modell berücksichtigen, teilt sich die Box in zwei Bereiche auf: In der unteren Zone entstehen wegen des warmen Bodens Turbulenzen. Ab einem bestimmten Punkt ist damit jedoch Schluss. Dort ist die Temperatur so niedrig, dass sich das Verhalten des Fluids ändert. Der obere Teil der Box teilt sich dann in stabile Lagen auf, in denen die Luftdichte mit der Höhe abnimmt – und ähnelt damit der Stratosphäre. Tatsächlich konnten wir beobachten, wie die unteren Turbulenzen Strömungen im oberen Bereich der Box erzeugen, die ihre Richtung nach einer gewissen Zeit spontan wechseln.

Damit haben wir erstmals ein rechnergestütztes Modell geschaffen (siehe Abbildungen S. 45), in dem sowohl die quasi-zweijährige Schwingung als auch chaotische Turbulenzen simuliert werden. Wir hoffen, damit in Zukunft bessere Vorhersagen treffen zu können.

Am meisten hat uns dabei verwundert, dass bereits ein so einfacher Ansatz genügt, um die quasi-zweijährige Schwingung nachzustellen. Schließlich enthält er nur zwei wesentliche Elemente: eine konvektive und eine stabile, aus mehreren Lagen bestehende Schicht.

Diese spezielle Konstellation taucht nicht nur in der Erdatmosphäre auf, sondern auch in vielen anderen Systemen. Inzwischen konnten Forscher etwa auf Jupiter und Saturn stratosphärische Winde beobachten, die sich alle zwei beziehungsweise acht Jahre umkehren. Zudem vermuten Astrophysiker periodische Strömungen im Inneren von Sternen, die ebenfalls aus einer konvektiven und einer daran angrenzenden, in Lagen geteilten Schicht bestehen. Einige Geologen gehen davon aus, dass selbst im Erdkern ein ähnliches Phänomen wie die quasi-zweijährige Schwingung auftritt. Das spannende Forschungsgebiet ist daher nicht nur für Meteorologen von Bedeutung, sondern wirkt sich auch auf viele andere naturwissenschaftliche Bereiche aus. ◂



NASA, GSFC SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/ozonloch-und-ozonschicht**

QUELLEN

Couston, L.-A. et al.: Order out of chaos: Slowly reversing mean flows emerge from turbulently generated internal waves. Physical Review Letters 120, 2018

Lindzen, R.S., Holton, J.R.: A theory of the quasi-biennial oscillation. Journal of Atmospheric Sciences 25, 1968

Semin, B. et al.: Nonlinear saturation of the large scale flow in a laboratory model of the quasibiennial oscillation. Physical Review Letters 121, 2018


BOSCH
Technik fürs Leben
AI can and AI will.
Gewinnen Sie den
Bosch AI Young Researcher Award und 50.000 €.
Trägt Ihre Forschung dazu bei, die Anwendung von Künstlicher Intelligenz sicher, robust und nachvollziehbar zu machen? Dann bewerben Sie sich bis zum 31. August 2019 für den Bosch AI Young Researcher Award.* Das Bosch Center for Artificial Intelligence forscht an sechs Standorten weltweit und in enger Zusammenarbeit mit international führenden Forschungseinrichtungen daran, Künstliche Intelligenz in die konkreten Anwendungen von morgen zu bringen. Weitere Informationen finden Sie auf unserer Website:
www.bosch-ai.com
*Die ausführlichen Teilnahmebedingungen für den Wettbewerb finden Sie auf unserer Website.



NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE (STSCI/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION (HUBBLESITE.ORG/IMAGE/2210)

PHYSIK

GIBT ES DIE DUNKLE MATERIE WIRKLICH?

Astronomen erklären mehrere rätselhafte Phänomene mit hypothetischen Teilchen, die trotz intensiver Suche bisher in keinem Experiment entdeckt wurden. Falls sie nicht existieren, funktioniert die Gravitation auf galaktischen Skalen wohl anders als gedacht.




Sabine Hossenfelder ist theoretische Physikerin am Frankfurt Institute for Advanced Studies und erforscht Physik jenseits des Standardmodells. Sie bloggt unter http://backreaction.blogspot.com und ist Autorin des Buchs »Das hässliche Universum« (S. Fischer, 2018). **Stacy S. McGaugh** ist Astrophysiker an der Case Western Reserve University. Er untersucht besondere Galaxien, die sich gut für Tests von Alternativen zur Dunklen Materie eignen.

▸▸ spektrum.de/artikel/1661442

Galaxien wie die hier abgebildete Spiralgalaxie Messier 74 rotieren meist anders, als allein auf Grund ihrer sichtbaren Materie zu erwarten wäre.

NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE (STSCI/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION (HUBBLESITE.ORG/IMAGE/2210)

Das größte Geheimnis der Sterne ist heute nicht mehr die Frage, warum sie leuchten, sondern warum sie sich so bewegen, wie sie es tun. Das Problem tauchte erstmals vor fast einem Jahrhundert auf: In den 1930er Jahren beobachtete der Schweizer Astronom Fritz Zwicky in einem Galaxienhaufen, dass einige der darin enthaltenen etwa 1000 Galaxien den gemeinsamen Schwerpunkt überraschend schnell umkreisen. Selbst großzügige Abschätzungen der einzelnen Massen lieferten nicht genug Gravitation, um das Verhalten zu erklären. Zwicky vermutete, eine unsichtbare Dunkle Materie müsse das System beeinflussen.

In den 1970er Jahren entdeckte die US-Astronomin Vera Rubin das gleiche Phänomen innerhalb einzelner Galaxien. Die Geschwindigkeiten der Sterne weit außerhalb des Zentrums blieben ungefähr so groß wie diejenigen der weiter innen gelegenen. Astronomen hatten erwartet, dass entferntere Sterne sich verlangsamen würden, weil dort geringere Anziehungskräfte herrschen. Auch hier reichte die sichtbare Masse nicht aus, um die Beobachtungen zu erklären. Rubin kam zu dem Schluss, in Galaxien müsse es ebenfalls die mysteriöse Dunkle Materie geben.

Seitdem haben sich noch mehr Hinweise darauf angesammelt, dass Astronomen irgendetwas übersehen. Zu den Indizien gehört erstens das Muster der winzigen Temperaturschwankungen in der so genannten kosmischen Hintergrundstrahlung, zweitens die Ablenkung des Lichts weit entfernter Quellen durch Galaxien und Galaxienhaufen sowie drittens die Art und Weise, wie sich Strukturen im Lauf der Entwicklung des Kosmos herausgebildet haben. Die Phänomene lassen sich auf Basis der bekannten Naturgesetze nicht allein mit normaler Materie erklären.

Die gängigste Hypothese fußt darum seit mehreren Jahrzehnten auf unsichtbaren Teilchen – unsichtbar, weil sie nicht mit Licht wechselwirken, sondern sich nur über ihre Schwerkraft verraten. Die Erklärung mittels Dunkler Materie ziehen die meisten Astronomen der denkbaren Alternative vor, die lautet: Wir haben die richtigen Teilchen bereits beisammen, beschreiben sie aber mit den falschen Gravitationsgesetzen. Vor 30 Jahren war die Haltung gut begründet. Die Idee der Dunklen Materie schien naheliegend, weil Physiker damals ohnehin reichlich Anlass hatten, an die Existenz neuer Teilchen zu glauben. In den 1950er und 1960er Jahren wurde ihnen klar, dass Protonen, Neutronen und Elektronen nicht die einzigen subatomaren Objekte sind. Im Lauf der darauf folgenden Jahrzehnte tauchten alle möglichen neuen Teilchen in Beschleunigern auf. Sie wurden zur Grundlage des so genannten Standardmodells und inspirierten Theoretiker zugleich zu dessen möglichen Erweiterungen.

So spekulierten Physiker während ihrer Versuche, die fundamentalen Kräfte der Natur zu vereinen, auf eine Reihe noch zu entdeckender Partikel. Insbesondere das in den 1970er Jahren entwickelte Konzept der Supersymmetrie postulierte für jedes bekannte Teilchen im Universum einen Spiegelpartner. Einige der hypothetischen Objekte wären Kandidaten für die Dunkle Materie. Als weiterer Anwärter tat sich das so genannte Axion hervor, das ursprünglich erfunden wurde, um den Wert eines bestimmten Parameters im Standardmodell zu erklären (siehe »Eine Falle für Axionen«, **Spektrum** März 2019, S. 12).

AUF EINEN BLICK
RÜCKKEHR EINES AUSSENSEITERS

1. Astronomen haben aus der unerklärlichen Bewegung von Sternen in Galaxien auf eine neue Art von Teilchen geschlossen. Diese dürften mit klassischer Materie fast nur über die Schwerkraft wechselwirken.
2. Doch noch gibt es keinen direkten Nachweis der »Dunklen Materie«. Zudem lassen sich einige jüngere Beobachtungen nicht damit vereinbaren.
3. Mit alternativen Modellen untersuchen Physiker, ob stattdessen die Gravitation auf verschiedenen Skalen anders funktioniert. Solche Ideen haben bisher nur eine Nebenrolle gespielt – vielleicht zu Unrecht.

Erfolglose Suchkampagnen und hartnäckige Probleme machen Alternativen wieder attraktiv

Doch nachdem sich drei Jahrzehnte lang keines der Teilchen bei Experimenten hat blicken lassen, ist es vielleicht an der Zeit, sich alternativen Hypothesen zuzuwenden. Zumal sich die Dunkle Materie mit einigen astrophysikalischen Daten nicht vereinbaren lässt, die von einem von uns (Stacy McGaugh) sowie anderen Wissenschaftlern gesammelt und analysiert worden sind. Außerdem bleiben einige alte Probleme des Paradigmas der Dunklen Materie hartnäckig bestehen, trotz aller zwischenzeitlich unternommenen Lösungsversuche.

Anstatt dem Universum unsichtbare Teilchen hinzuzufügen, um den Galaxien die für ihre Bewegungen nötige zusätzliche Schwerkraft zu verleihen, könnten wir also bei den bekannten Teilchen bleiben, aber die Kraft verändern, die sie aufeinander ausüben. Solche Modelle werden als modifizierte Gravitationstheorien bezeichnet und haben bisher eine Außenseiterrolle eingenommen.

1983 hat der israelische Physiker Mordehai Milgrom erstmals seine »modifizierte newtonsche Dynamik« (MOND) vorgestellt. Bei diesem Gravitationsgesetz ändern sich die mathematischen Regeln, die Masse und Schwerkraft verknüpfen. Das sind in den meisten, nicht allzu extremen Situationen Newtons bekannte Gleichungen: Die Stärke der Anziehung zwischen zwei Objekten hängt von ihrer Masse ab und sinkt mit dem Quadrat ihres Abstands. Auf so eine Beziehung trifft man überall in der Physik. Vergleichbares gilt etwa bei der Schallausbreitung oder bei Formeln, die beschreiben, wie die Intensität von Strahlung im Raum abnimmt. Möglicherweise folgt die Schwerkraft nicht immer dem quadratischen Abstandsgesetz. Was passiert, wenn die Gleichungen unter bestimmten Umständen angepasst werden müssen?

Milgroms modifizierte newtonsche Dynamik basierte in ihrer ersten Form allein auf Newtons Gesetzen. Genau

genommen ist Gravitation aber gar keine Kraft, sondern laut Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie eine Folge der Krümmung des Gefüges von Raum und Zeit. Das war vermutlich einer der Hauptgründe, warum viele Physiker die MOND-Idee anfangs nicht ernst nahmen. Inzwischen haben Theoretiker allerdings Strategien entwickelt, mit denen sie MOND mit der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar machen. Um zu beschreiben, wie die Wirkung der Gravitation aus der Masse hervorgeht, verwendet jeder der modernen Ansätze verschiedene Arten von Feldern. Sie alle verhalten sich leicht unterschiedlich.

Darum ist das, was wir hier unter der Bezeichnung modifizierte Gravitation zusammenfassen, eigentlich eine Gesamtschau von rund zehn Modellen. Trotz dieser Vielfalt ist es aus theoretischer Sicht nicht gerechtfertigt, sie pauschal abzulehnen. Ein weiterer häufiger Einwand gegen die modifizierte Gravitation ist ihre aus der Sicht der Teilchenphysik unelegante mathematische Form. Sie ist ungewohnt und schwieriger zu handhaben als die Modelle mit Dunkle-Materie-Teilchen. Letztere lassen sich mit Standardtechniken beschreiben, denen jeder Physiker in den Grundzügen bereits im Studium begegnet. Diese Faktoren mögen erklären, warum die Idee unbeliebt ist, aber sie sind rein wissenschaftlich gesehen kein Argument dagegen.

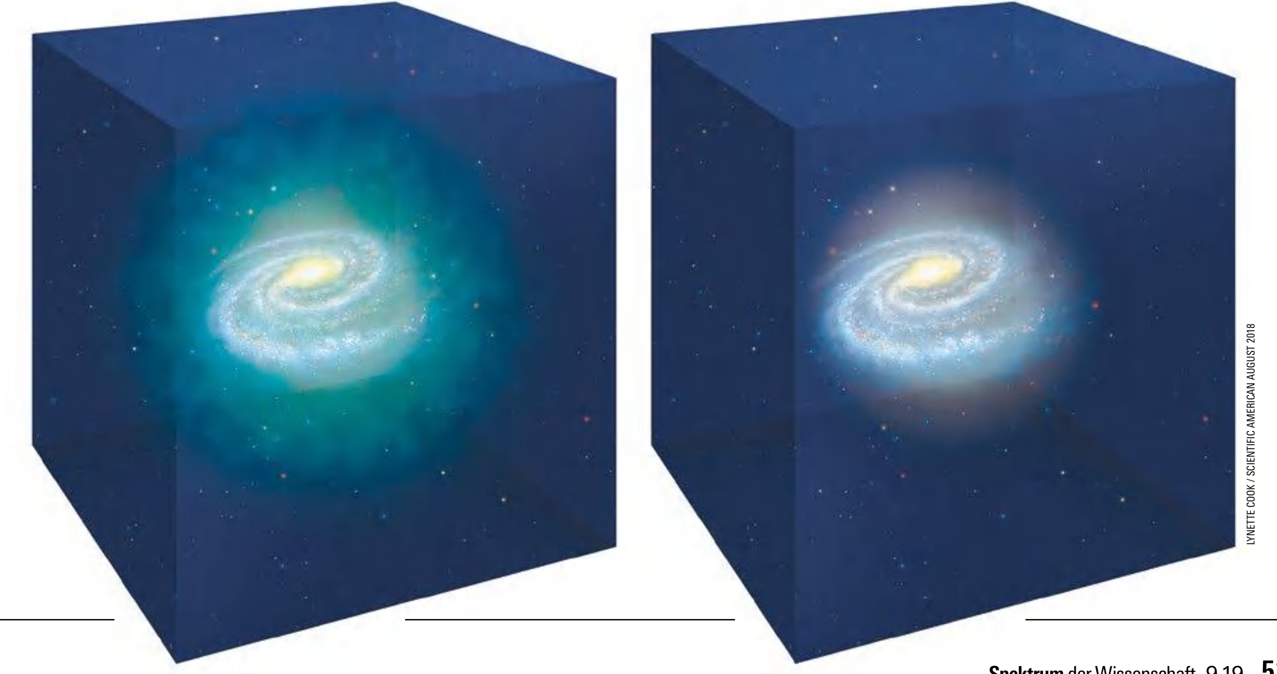
Dennoch ist bislang der Löwenanteil der Arbeit, um die astronomischen Befunde zu erklären, in die Suche nach Dunkler Materie geflossen. Seit Mitte der 1980er Jahre haben etliche Projekte den hypothetischen Wechselwirkungen zwischen normaler und Dunkler Materie nachgespürt. Die Experimente bestehen beispielsweise aus riesigen, mit flüssigen Edelgasen gefüllten Tanks oder sorgfältig aufbereiteten Festkörpern bei extrem niedrigen Temperaturen in gut abgeschirmten Umgebungen in alten Minen tief unter der Erde, um die Fehlsignale von kosmischer Strahlung zu reduzieren. Extrem empfindliche Detektoren harren geduldig der verräterischen Anzeichen einer Wechselwirkung zwischen Dunkler Materie einerseits und andererseits einem Atomkern im flüssigen oder festen Zielmedium. Bis

Dunkle Materie und modifizierte Gravitation

Die sichtbare Materie allein reicht nicht aus, um auf Basis der bekannten Naturgesetze die Bewegungen von Sternen und Galaxien zu beschreiben. Astronomen erklären die fehlende Masse durch Dunkle Materie aus noch unbekannten Teilchen. Diese sind allerdings bisher in keinem Experiment aufgetaucht. Einige Forscher fragen sich deswegen, ob stattdessen vielleicht die Gravitationstheorie modifiziert werden muss.

Im Modell der Dunklen Materie ist das All von bislang nicht detektierbaren Teilchen erfüllt, deren Masse die herkömmliche Materie deutlich überwiegt. Sie soll sich beispielsweise um jede Galaxie in Form eines »Halo« (links, türkisfarbene Wolke) sammeln und so gerade genug Masse beitragen, um mit ihrer Anziehungskraft die weiter außen gelegenen Sterne auf die real gemessenen Geschwindigkeiten zu beschleunigen.

Falls Dunkle Materie nicht existiert (rechts), würde die Gravitation auf die Sterne am Rand von Galaxien nach anderen Regeln wirken. Dann gäbe es nichts außer den bereits bekannten Objekten. Um dennoch ihre beobachteten Bewegungen zu erklären, müssten Einsteins Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie überarbeitet werden.



LYNETTE COOK / SCIENTIFIC AMERICAN AUGUST 2018

heute vergeblich. An keiner der Einrichtungen ist ein Teilchen aufgetaucht – sei es am spezialisierten XENON1T im Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien, wo Forscher nach einer bestimmten Variante namens WIMP suchen, oder am Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf, das jenseits des erwarteten Higgs-Bosons keine neuartigen Teilchen erzeugt hat.

Freilich schließen diese Negativergebnisse die Dunkle Materie nicht vollends aus. Die Theorien dazu sind mit der Zeit immer ausgefeilter, um nicht zu sagen künstlich geworden. Um die Modelle mit den experimentellen Resultaten zu vereinbaren, gehen Physiker inzwischen davon aus, dass die Teilchen noch weniger mit der normalen Materie wechselwirken als ursprünglich angenommen. Einige Forscher vermuten zusätzlich zu den ursprünglich postulierten Partikeln neue Kräfte und weitere Arten von Materie. In der wissenschaftlichen Literatur wird die Menge unbekannter, hypothetischer Bestandteile des Kosmos mittlerweile mit einem eigenen Sammelbegriff als »verborgener Sektor« bezeichnet.

Dunkle Materie ist flexibel – vielleicht zu sehr

Solange es keine direkten Beweise für neue Teilchen gibt, sollten wir uns fragen, wie gut die Theorien der Dunklen Materie beziehungsweise der modifizierten Gravitation die bisherigen Beobachtungen erklären. Insgesamt beschreibt die dominierende Hypothese, das Universum enthalte etwa fünfmal so viel Dunkle Materie wie normale, den Kosmos um uns herum recht gut. Zwar können die mikroskopischen Eigenschaften der Dunklen Materie kompliziert sein, aber sie lässt sich in großen Ansammlungen auf galaktischen Skalen mit einfachen Gleichungen beschreiben. Formal können wir die Dunkle Materie als eine Flüssigkeit ohne inneren Druck betrachten. Dafür brauchen wir nur eine Variable, nämlich die durchschnittliche Dichte der Teilchen im Raum.

Eine solche mathematische Behandlung reicht bereits aus, um die beobachteten Muster in der kosmischen Hintergrundstrahlung zu reproduzieren, die kurz nach dem Urknall entstanden ist. Auch bei der nachfolgenden Bildung großer kosmischer Strukturen funktioniert das Prinzip. Als sich das heiße, junge Universum ausdehnte und langsam abkühlte, konnte die Dunkle Materie keinen inneren Druck aufbauen. Deswegen ist sie unter dem Sog der Schwerkraft schneller verklumpt. In den so entstandenen Dunkle-Materie-Wolken hat sich die normale Materie erst später gesammelt und Galaxien gebildet. Das Szenario passt gut zu einigen Beobachtungen.

Die Dunkle Materie erklärt außerdem die Bewegungen der Sterne innerhalb der Galaxien, je nachdem, wie man sie darin verteilt. Ähnliches gilt für Galaxienhaufen. Theoretiker können die Dunkle Materie bedarfsgerecht relativ frei einsetzen und auf diese Weise alle Beobachtungen mit den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie in Einklang bringen. Die Flexibilität der Dunklen Materie ist allerdings zugleich ihr größter Makel. Keine zwei Galaxien sind gleich, denn jede hat ihre eigene Entstehungsgeschichte. Einige kleinere Exemplare sind in jungem Alter kollidiert und haben größere gebildet. Andere nicht. Manche enden als

Galaktischer Ausreißer



RÖNTGEN: NASA/CXC/M.MARKEVITCH ET AL.; OPTISCH: NASA/STSCI, MAGELLAN/U.ARIZONA/D.CLOWE ET AL.; LENSING: NASA/STSCI, ESO WFI, MAGELLAN/U.ARIZONA/D.CLOWE ET AL. (WWW.SPACETELESCOPE.ORG/IMAGES/OPO0639A/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Der »Bullet Cluster« besteht aus zwei Galaxienhaufen, die vor langer Zeit zusammengestoßen sind. Es war ein seltener Fall eines schnellen Frontalaufpralls. Aufnahmen im sichtbaren und Röntgenlicht (rot) sowie Messungen der von der Gravitation abgelenkten Strahlung (blau) zeigen: In jedem der beiden Haufen sind der Schwerpunkt der Gesamtmaterie einerseits und derjenige der sichtbaren Materie andererseits gegeneinander verschoben.

Deswegen wird der Bullet Cluster oft als ein Beleg für die Existenz der Dunklen Materie herangezogen. Da Letztere viel schwächer als die normale Materie mit sich selbst wechselwirkt, hätte die Kollision – grob vereinfacht – dazu geführt, dass die beiden ursprünglichen Wolken aus Dunkler Materie aneinander vorbeigezogen sind, während sich die Ansammlungen aus sichtbarer Materie gegenseitig gebremst haben.

Allerdings kann der Punkt, an dem sich die Schwerkraft konzentriert, auch in der modifizierten Gravitation gegenüber der normalen Masse verschoben sein. Das liegt daran, dass im Rahmen dieses Modells alle Kräfte von einer speziellen Art von Teilchen mit eigenen dynamischen Gesetzen übertragen werden. Wenn man deren mögliche Auswirkungen in der modifizierten Gravitation berücksichtigt, kann sie ebenfalls vorhersagen, was wir im Bullet Cluster sehen.

Noch wichtiger ist jedoch, dass der Bullet Cluster ein Extremereignis und ein statistischer Ausreißer ist. Seine bloße Existenz ist weder mit der Dunklen Materie noch mit der modifizierten Schwerkraft leicht zu erklären. Ihn als Beweis für oder gegen einen der beiden Ansätze zu verwenden, läuft immer darauf hinaus, alle Parameter gerade so zu wählen, dass sie die eigenen Vorlieben bestätigen.

flache, rotierende Scheiben, manche als aufgeblähte, elliptische Gebilde. Mal fängt die Dunkle Materie mit ihrer Anziehungskraft viel normale Materie ein, mal nicht. Auf Grund dieser Vielfalt sollte sich das Verhältnis von Dunkler zu normaler Materie von Galaxie zu Galaxie unterscheiden. Doch die Daten sprechen eine andere Sprache.

Einer von uns (McGaugh) führte mit Kollegen 2016 Tausende von Messungen an mehr als 150 Galaxien durch. Beim Vergleich der Gravitationskraft, die man allein auf Basis der sichtbaren Materie erwarten sollte, mit der beobachteten, die ja aus der Kombination von Dunkler Materie und normaler Materie resultieren sollte, gab es überraschenderweise eine starke Korrelation. Tatsächlich lassen sich beide sogar mittels einer einfachen Gleichung verknüpfen, und die individuellen Abweichungen sind sehr gering (siehe »Problematischer Befund für die Dunkle Materie«, S. 56).

Diese Korrelation ist mit Computersimulationen, welche die beiden Materiearten als unabhängige Komponenten behandeln, nur schwer reproduzierbar. Dafür müssen Wissenschaftler viele Parameter sorgfältig aufeinander abstimmen. Im Gegensatz dazu ergibt sich der Zusammenhang aus der modifizierten Gravitation direkt: Weil das Szenario eben nur eine Art von Materie kennt, folgt die insgesamt ausgeübte Gravitation auf eindeutige Weise aus der sichtbaren Materie. Milgrom hat eine solche Beobachtung bereits in den frühen 1980er Jahren vorhergesagt.

Exotische Galaxien erfordern ungewöhnliche Erklärungen

Die Dunkle Materie macht noch in anderen Bereichen Probleme, zum Beispiel bei so genannten Low Surface Brightness Galaxies (kurz LSBs, englisch für Galaxien mit geringer Oberflächenhelligkeit). Bei diesen leuchtschwachen Galaxien ist die sichtbare Materie dünner verteilt als bei Exemplaren wie der Milchstraße.

Die Hypothese der Dunklen Materie führte ursprünglich zu der Annahme, dass Galaxien mit geringer Oberflächenhelligkeit – also wenig sichtbarer Materie – zudem wenig Dunkle Materie enthalten sollten. Sterne, die in großen Entfernungen vom galaktischen Zentrum kreisen, müssten sich hier langsamer bewegen als in normalen Galaxien gleicher Größe, da die Sterne auf ihren Bahnen insgesamt von weniger Masse beschleunigt werden. Die Erwartung erwies sich als falsch. Laut Beobachtungsdaten bewegen sich die äußeren Sterne in den ungewöhnlichen Galaxien genauso schnell wie in normalen. Das deutet darauf hin, dass in LSBs trotz spärlich verteilter Sterne tatsächlich ziemlich viel Materie steckt. Deswegen muss das Verhältnis von Dunkler Materie zu normaler deutlich höher sein als ursprünglich erwartet. Aber warum?

Ursprünglich bot das Modell der Dunklen Materie keine Antwort. Theoretiker fanden dennoch Wege, die seltsame Situation zu erklären. Dazu mussten sie die Menge der Dunklen Materie in jeder Galaxie und die Oberflächenhelligkeit der Sterne fein aufeinander abstimmen: je leuchtschwächer das System, desto mehr Dunkle Materie. Das funktioniert nur mit Hilfe eines Mechanismus, der die Galaxien von der sichtbaren Materie befreit, noch während sie sich bilden. Dann verschiebt sich das Verhältnis zu Gunsten der Dunklen Materie. Die derzeit beliebteste Methode ist es, den Computersimulationen »stellares Feedback« hinzuzufügen. Der Begriff bezeichnet einen Effekt, bei dem massereiche Sterne das Gas in ihrer Umgebung intensiver Strahlung aussetzen, starke Sternwinde erzeugen und schließlich als Supernova explodieren. So blasen sie Materie aus den Galaxien hinaus. Die nur schwach wechselwirkende Dunkle Materie ist davon kaum betroffen. Galaxien mit vielen Supernovae bekämen daher irgendwann einen Überschuss an Dunkler Materie.

Stellares Feedback spielt zwar eine wichtige Rolle bei der Bildung von Sternen und Sternhaufen, doch seine Bedeutung für die Entstehung von Galaxien ist weniger klar. Um das Problem bei LSBs zu lösen, müssen die Supernovae ihre Energie fast vollständig in das Hinausschleudern der Materie aus den Galaxien stecken. Ein derart hoher Wirkungsgrad ist für einen natürlichen Vorgang nicht plausibel.

Galaxien mit geringer Oberflächenhelligkeit sind aber bei Weitem nicht der einzige Fallstrick für die Dunkle Materie. Eine Auswahl der größten Unstimmigkeiten: Theoretisch wäre mit ihr zu erwarten, dass die Konzentration der Materiedichte in den Galaxienkernen einen ausgeprägten Spitzenwert aufweist. Doch so etwas messen Astronomen nicht. Auch die Anzahl von Zwerggalaxien sollte höher sein als beobachtet; außerdem stimmt die Art und Weise, wie sich Galaxien und ihre Begleiter in einer Ebene ausrichten, nicht mit den Vorhersagen überein. Modifizierte Gravitation schneidet hier überall besser ab.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/dunkle-materie**



X-RAY: NASA/CXC/UVIC./A.MAHDAVI ET AL.; OPTICAL/LENSING: CFHT/UVIC./A.MAHDAVI ET AL.

Vor allem das Fehlen von Dichtespitzen in galaktischen Kernen passt so schlecht zur Theorie der Dunklen Materie, dass viele Astrophysiker die Daten zu Beginn grundsätzlich anzweifelten. Zunächst behaupteten sie, die Auflösung der Messungen sei unzureichend. Als zusätzliche Erhebungen den Kritikpunkt obsolet machten, gaben sie anderen systematischen Fehlern die Schuld. Aber nach zahlreichen weiteren Beobachtungen durch verschiedene Arbeitsgruppen bleibt die Schlussfolgerung: Die Dunkle Materie erklärt ziemlich schlecht, was sich in den Zentren der Galaxien abspielt.

Die Einbeziehung von stellaren Rückkopplungen und anderen astrophysikalischen Effekten bei Computersimulationen mindert die Probleme. Mit den zusätzlichen Prozessen fügen die Forscher ihren Simulationen weitere Parameter hinzu. Die größere Zahl von Einstellmöglichkeiten erleichtert es, virtuelle Galaxien zu erzeugen, die den real beobachteten ähneln. Die so produzierten Galaxien spiegeln

dann auch die beobachtete Korrelation zwischen der Menge an Dunkler und normaler Materie wider. Die Computersimulationen lassen jedoch keinen eigentlichen Grund für die Entstehung dieses Zusammenhangs erkennen.

Die modifizierte Gravitation kann im Gegensatz zu Simulationen mit Dunkler Materie obendrein erklären, wie sich kleine Galaxien im Schwerefeld größerer Galaxien verhalten. Die Berechnungen sagten erfolgreich vorher, wie diverse jüngst entdeckte Zwerggalaxien um unseren nächsten großen Nachbarn wirbeln, die Andromedagalaxie. Die Zwerggalaxien unterliegen einer Anziehungskraft, die stärker ist als ihre innere Schwerkraft. In einer solchen Situation prognostiziert die modifizierte Gravitation ein anderes Verhalten als bei isolierten Zwerggalaxien, und die Vorhersage stimmt mit den Beobachtungen überein. Um den Aspekt hingegen mit der Dunklen Materie zu vereinbaren, brauchen die Computersimulationen weitere ergänzende Annahmen.

Im Kosmos gewinnt Dunkle Materie, in Galaxien modifizierte Gravitation – kann beides stimmen?
Trotz solcher Erfolge bereitet die modifizierte Gravitation bei anderen Vorhersagen ernsthafte Probleme. Obwohl sie über eine große Bandbreite verschiedener Galaxientypen funktioniert, kann sie die Bewegung von Galaxienhaufen nicht gut erklären. Um das Verhalten des Kosmos als Ganzes nachzuvollziehen, ist sie sogar völlig ungeeignet. Hier funktioniert die Dunkle Materie besser. Sie beschreibt die Eigenschaften des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und die Verteilung der Galaxien im gesamten Universum, wo die modifizierte Gravitation versagt. Doch Letztere völlig zu ignorieren, bloß weil sie in diesen Situationen nicht funktioniert, wäre unangemessen. Schließlich liefert das Modell woanders erfolgreich Vorhersagen, selbst wenn wir nicht verstehen, weshalb.

Sowohl die Dunkle Materie als auch die modifizierte Gravitation haben also Vor- und Nachteile. Einige neuere theoretische Entwicklungen deuten darauf hin, dass die Wahrheit vielleicht dazwischenliegt: eine besondere Form Dunkle Materie, die sich unter gewissen Umständen als modifizierte Gravitation verkleidet.

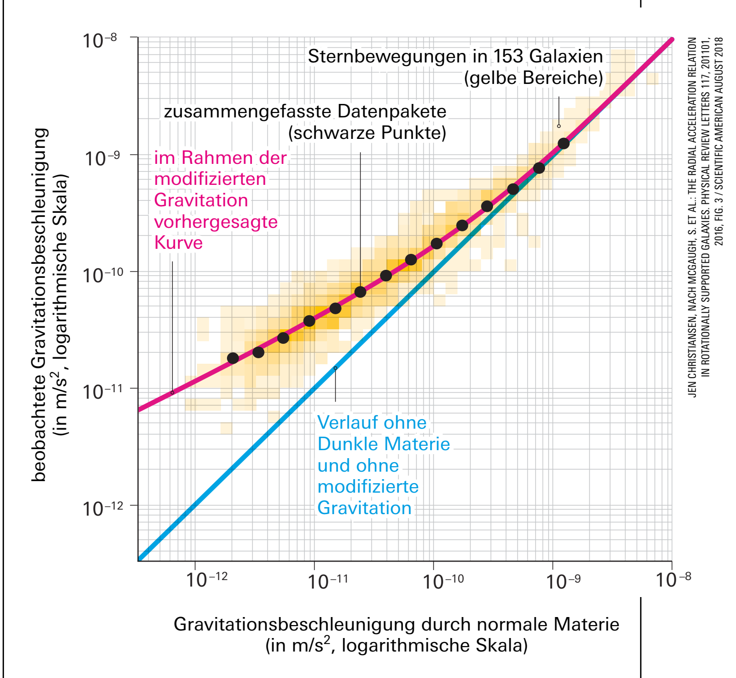
2015 fand ein Team um Justin Khoury von der University of Pennsylvania heraus, dass einige Arten von Dunkler Materie »suprafluid« werden könnten. Das heißt, sie fließen auf Grund von Quanteneffekten ohne jede innere Reibung. Wenn sich diese Form Dunkler Materie in Galaxien sammelt, kann sie zur Supraflüssigkeit werden und als solche eine Kraft mit großer Reichweite hervorrufen, die der modifizierten Gravitation ähnelt.

Khourys Hypothese zufolge stammt der größte Teil des Effekts, den Physiker bisher der Dunklen Materie zuordnen, gar nicht von der Gravitation selbst, obwohl das Suprafluid ebenso eigene Schwerkraft ausübt. Vielmehr wechselwirkt die Supraflüssigkeit mit der normalen Materie auf eine andere Weise. Das Phänomen würde erklären, wieso die Kraft, die in Galaxien offenbar auf die normale Materie wirkt, nicht gut mit Gravitation zu erklären ist – sie wird gar nicht durch Gravitation verursacht. Die Vorstellung von einer Supraflüssigkeit beantwortet zudem die Frage, warum die modifizierte Gravitation für Galaxienhaufen nicht mehr gut funktioniert. In ihnen ist die Schwerkraft in den meisten Bereichen nicht stark genug, um die Teilchen in den suprafluiden Zustand zu bringen. In diesen Situationen verhalten sie sich wie eine normale Flüssigkeit, das heißt wie Dunkle Materie.

Eine von uns (Sabine Hossenfelder) stellte zufällig fest: Das Konzept einer Supraflüssigkeit passt zu einer anderen Forschungsrichtung, deren Pionier Erik Verlinde von der Universität Amsterdam ist. Verlinde argumentiert mit Hilfe von Konzepten aus der Stringtheorie, dass der Anschein, das Universum enthielte mehr Materie, als wir sehen können, eine Illusion ist. Sie entstehe durch die Reaktion des Raums auf die Anwesenheit von Masse. Zwar scheint der Ansatz zunächst etwas völlig anderes zu sein als Khourys Hypothese einer Supraflüssigkeit, doch die entscheidende Gleichung ist in beiden Fällen fast identisch. Das Forschungsfeld ist noch jung und könnte sich als Sackgasse erweisen. Aber es zeigt exemplarisch, wie ein genauerer

Problematischer Befund für die Dunkle Materie

Bei einer Untersuchung der Sternbewegungen in 153 unterschiedlichen Galaxien stellte sich 2016 heraus: Die Gesamtgravitation ist zur Gravitationswirkung der normalen Materie proportional. Ein so direkter Zusammenhang passt nicht zum Ansatz der Dunklen Materie. Deren Menge sollte angesichts der vielfältigen Formen und Zusammensetzungen von Galaxien nicht allein von der sichtbaren Materie abhängen. Mit Modellen der modifizierten Gravitation lässt sich der Verlauf jedoch gut erklären.



Blick auf die modifizierte Gravitation helfen könnte, die gegenwärtige Stagnation auf der Suche nach Dunkler Materie zu überwinden.

Neue Messdaten dürften bald mehr Licht in die Angelegenheit bringen. Klassische Dunkle Materie, modifizierte Gravitation und suprafluide Dunkle Materie liefern unterschiedliche Vorhersagen für Galaxien mit geringer Oberflächenhelligkeit. Himmelsdurchmusterungen wie der 2013 begonnene Dark Energy Survey (siehe »Das dunkelste Geheimnis«, **Spektrum** September 2016, S. 18) halten nach solchen Galaxien Ausschau, und das Large Synoptic Survey Telescope in Chile wird wohl Hunderte von ihnen ins Visier nehmen, sobald es Anfang der 2020er Jahre den Betrieb aufnimmt.

Die Theorien unterscheiden sich außerdem hinsichtlich des frühen Universums und seinen ersten Galaxien. Diese sollten mit dem James-Webb-Weltraumteleskop der NASA beobachtbar werden, das voraussichtlich im kommenden Jahrzehnt starten wird. Zukünftige Radioteleskope dürften sogar Signale aus noch früheren Epochen des Kosmos empfangen.

Dazu kommt das neue Feld der Gravitationswellenastronomie. Das LIGO-Observatorium hat bereits Gravitationswellen nicht nur von den Kollisionen diverser Schwarzer Löcher erfasst, sondern sogar von Neutronensternen. Von einem solchen Ereignis ist zudem Licht in verschiedenen Wellenlängen ausgegangen, das herkömmliche Teleskope unmittelbar danach detektieren konnten (siehe »Das Raumzeitbeben von NGC 4993«, **Spektrum** Januar 2018, S. 58). Die Daten zeigten mit hoher Präzision, dass sich Gravitationswellen mit derselben Geschwindigkeit wie Licht fortbewegen. Dieser Befund hat einige, aber nicht alle Varianten der modifizierten Gravitation ausgeschlossen.

Derzeit beschäftigen sich lediglich ein paar Dutzend Theoretiker mit der modifizierten Gravitation, während Tausende von Wissenschaftlern nach Dunkler Materie suchen. Eventuell irren sich Erstere, doch unter Umständen strengt sich die Forschergemeinschaft auch nicht genug an, um alle Optionen zu berücksichtigen. Das Universum hat uns schon einige Male auf dem falschen Fuß erwischt; wir sollten den Überraschungen, die sich in zukünftigen Daten offenbaren könnten, möglichst gut vorbereitet und vorurteilsfrei begegnen. ◂

QUELLEN

Berezhiani, L., Khoury, J.: Theory of dark matter superfluidity. Physical Review D 92, 2015

Hossenfelder, S.: Covariant version of Verlinde's emergent gravity. Physical Review D 95, 2017

McGaugh, S.S. et al.: Radial acceleration relation in rotationally supported galaxies. Physical Review Letters 117, 2016

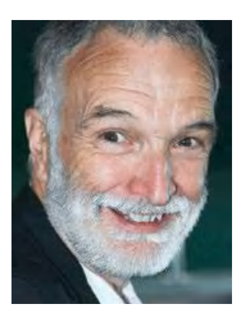
WEBLINK

www.youtube.com/watch?v=2VNcDoLNJk8

Autorin Sabine Hossenfelder erklärt im Video den Zusammenhang zwischen veränderten Gleichungen für die Gravitationskraft und den Bewegungen in Galaxien (englisch, deutsche Untertitel zuschaltbar).



SCHLICHTING!
HUNDE IM SCHLEUDERGANG



Viele Landtiere trocknen ihr nasses Fell, indem sie ihren Körper schnell hin- und herdrehen. Das überträgt große Kräfte auf das anhaftende Wasser, wodurch es zu den Haarspitzen drängt und sich dort rasch ablöst.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1661444

Er schüttelt es ab wie der Hund den Regen
Karl Simrock (1802–1876)

Wer neben einem Hund steht, der sein nasses Fell schüttelt, merkt sofort: Die Trocknungstechnik ist äußerst gründlich. Ein Großteil des im Pelz steckenden Wassers wird innerhalb weniger Sekunden ringsum davongeschleudert. Ein Wasser liebender Hund geht deswegen selbst bei Temperaturen, die unsereins nicht gerade zum Baden einladen, ohne Zögern gewissermaßen mit voller Bekleidung schwimmen.

Beim Eintauchen verdrängt das Wasser die im Fell enthaltene Luft teilweise. Es leitet Wärme wesentlich besser und erhöht deren Transport vom Körper zur Umgebung um einen Faktor von etwa zwölf. Dadurch droht anschließend Unterkühlung: Würde er warten, bis alles von selbst verdunstet und er wieder trocken ist, verlöre ein 30 Kilogramm schwerer Hund mit 500 Gramm Wasser im Fell rund 20 Prozent der Energie, die er pro Tag mit der Nahrung aufnimmt.

Den kühlenden Effekt nasser Haut spürt jeder augenblicklich, der nach einem Bad aus dem Wasser steigt. Selbst bei eigentlich angenehmen Temperaturen lässt einen der kleinste Windhauch frösteln. Da Landtiere in ihrem dichten Pelz große Mengen Wasser speichern, ist ihre Situation deutlich dramatischer. Ein trockener Körper kann für sie überlebenswichtig sein!

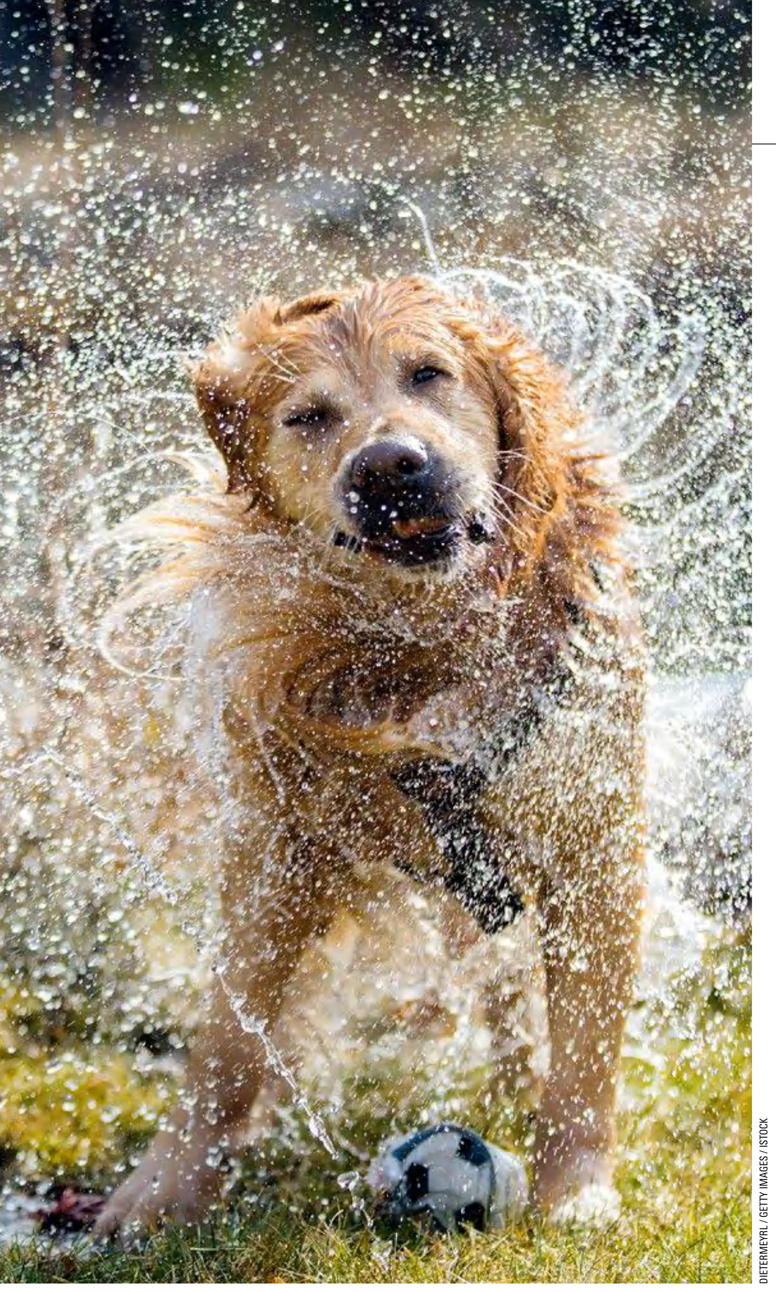
Wie viele Materialien ist auch das Fell eines Hunds weitgehend »hydrophil«, das heißt, Wasser haftet ziemlich hartnäckig daran. Denn die Ausbildung einer Grenzfläche zwischen Härchen und Wasser benötigt weniger Energie als die einer Grenzfläche zur Luft. Dadurch entsteht eine Adhäsionskraft. Um sie zu überwinden und Tröpfchen aus dem Fell zu lösen, ist eine entsprechende Gegenkraft nötig. Tropfen mit einer bestimmten Mindestgröße und einer verhältnismäßig kleinen Kontaktfläche mit den Haaren fallen in der Regel bereits auf Grund der Schwerkraft. Die überwiegende Menge der anhaftenden Feuchtigkeit bleibt aber erst einmal hängen.

Um das Wasser loszuwerden, schütteln sich viele Tiere, setzen also ihren Körper und damit das durchnässte Fell starken Bewegungen aus. Erst wenn die Kraft, welche die Wasserteilchen auf eine Kreisbahn zwingt, die jeweilige Adhäsionskraft übersteigt, reißt die Verbindung zum Fell. Die nunmehr befreiten Tropfen bewegen sich nach dem Trägheitsprinzip gleichförmig geradlinig weiter. Oder besser: Sie würden es tun, wenn da nicht noch die allgegenwärtige Schwerkraft wäre. Diese bringt sie je nach Ablösegeschwindigkeit auf eine Wurfparabel. Ein sich schüttelnder, nasser Hund ist darum von einer Wolke umgeben, in der Tropfen diverser Größe auf verschiedensten Bahnen davonfliegen (siehe Foto rechts oben).

Warum die Technik der Tierwelt unterlegen ist

Das Prinzip der Trocknungsmethode wird schon lange technisch genutzt. Im Schleudergang einer Waschmaschine beschleunigt die Trommel die nasse Kleidung auf eine so hohe Rotationsgeschwindigkeit, dass sich ein großer Teil des anhaftenden Wassers von den Fasern löst und durch die Löcher der Trommel entkommt. Hier dauert der Prozess mehrere Minuten, wohingegen sich ein Hund in sehr kurzer Zeit ziemlich gründlich entwässert. Was ist das Geheimnis pelziger Tiere, das sie so schnell trocknen lässt?

Diese Frage haben US-Wissenschaftler um David L. Hu vom Georgia Institute of Technology in Atlanta genauer untersucht. Unterstützt vom örtlichen Zoo vermaßen die Forscher verschiedene Säuger, spritzten sie nass und filmten sie mit Hochgeschwindigkeitskameras beim Trockenschütteln. Dieses beginnt im Allgemeinen mit einer schnellen Drehung des Kopfes. Mit einer gewissen Phasenverschiebung folgt der übrige Körper, wobei



DIETERMEYRL / GETTY IMAGES / ISTOCK

das Rückgrat etwa 30 Grad weit in die eine und andere Richtung gedreht werden kann. Doch die leicht verschiebbare Haut rotiert noch viel weiter – bis zu 90 Grad zu beiden Seiten – und deutlich schneller als die Wirbelsäule selbst. Dabei dürften neben der Trägheit, mit der die Hautpartien die Bewegung noch eine Zeit lang beibehalten, elastische Kräfte aus der Verbindung zum übrigen Körpergewebe im Spiel sein. Sie zerren an der Haut wie Gummibänder. Jedenfalls sind die herauskatapultierten Wassertropfen den Berechnungen der Forscher zufolge Kräften vom 10- bis 70-Fachen der Gravitation ausgesetzt. Angesichts solcher Beschleunigungen schließen die Tiere dabei die Augen, um diese vor Verletzungen zu schützen.

Beim Trocknen durch Schütteln lösen sich zunächst die Tropfen, die an den Spitzen der Haare anhaften. Gleichzeitig rückt Feuchtigkeit aus tieferen Schichten nach. Sie wird dann im nächsten Drehzyklus abgelöst. Das setzt sich fort, bis der Nachschub versiegt und das Fell hinreichend entwässert ist. Die Kraft, mit der die Tropfen beschleunigt werden, variiert und hängt vom Krümmungsradius der Bewegung ab – je größer das Tier, desto mehr Schwung entsteht. Deswegen müssen sich kleinere Säuger mit einer höheren Frequenz schütteln, um Wassertropfen unter sonst gleichen Bedingungen loszuwerden. Ein Labrador Retriever trocknet sich typischerweise mit einer Frequenz von 4,5 Hertz (Schwingungen pro Sekunde). Eine Maus braucht dagegen unglaubliche 29 Hertz – eine so schnelle Bewegung können wir mit den Augen gar nicht mehr wahrnehmen. Die Forscher verknüpften anhand eines quantitativen Modells die Masse eines Tiers recht genau mit der nötigen Schüttelfrequenz.

Wer das nächste Mal neben sich einen Hund aus dem Wasser kommen sieht, sollte also vielleicht einmal in Ruhe hinschauen, statt hastig auf Distanz zu gehen. Dann wird man zwar nass, aber zugleich Zeuge eines äußerst interessanten physikalischen Vorgangs.

Nicht nur Hunde wirbeln ihr nasses Fell trocken (oben), sondern auch viele andere Tierarten von der Maus bis zum Bären (unten). Die dafür nötige Drehfrequenz hängt vom Körpergewicht ab.

QUELLE

Dickerson, A.K. et al.: Wet mammals shake at tuned frequencies to dry. Journal of the Royal Society Interface 9, 2012

MAARTEN1986 / GETTY IMAGES / ISTOCK



QUANTENGRAVITATION

KOSMISCHER KORREKTURCODE

Die kleinsten Speichereinheiten in Quantencomputern sind äußerst anfällig für Fehler – die sich allerdings mit Hilfe komplizierter Schaltungen ausgleichen lassen. Jetzt mutmaßen theoretische Physiker, dass ähnliche Quantenkorrekturen die Raumzeit stabilisieren könnten.

THOMASLENNE / GETTY IMAGES / ISTOCK

Natalie Wolchover ist Physikerin in New York und schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

spektrum.de/artikel/1661446



AUF EINEN BLICK
EIN ALGORITHMUS FÜR DIE RAUMZEIT

1. In Quantencomputern können Umwelteinflüsse die empfindlichen Zustände der Speicher-Qubits so stören, dass diese für Berechnungen untauglich werden. Aufwändige Verfahren verhindern das.

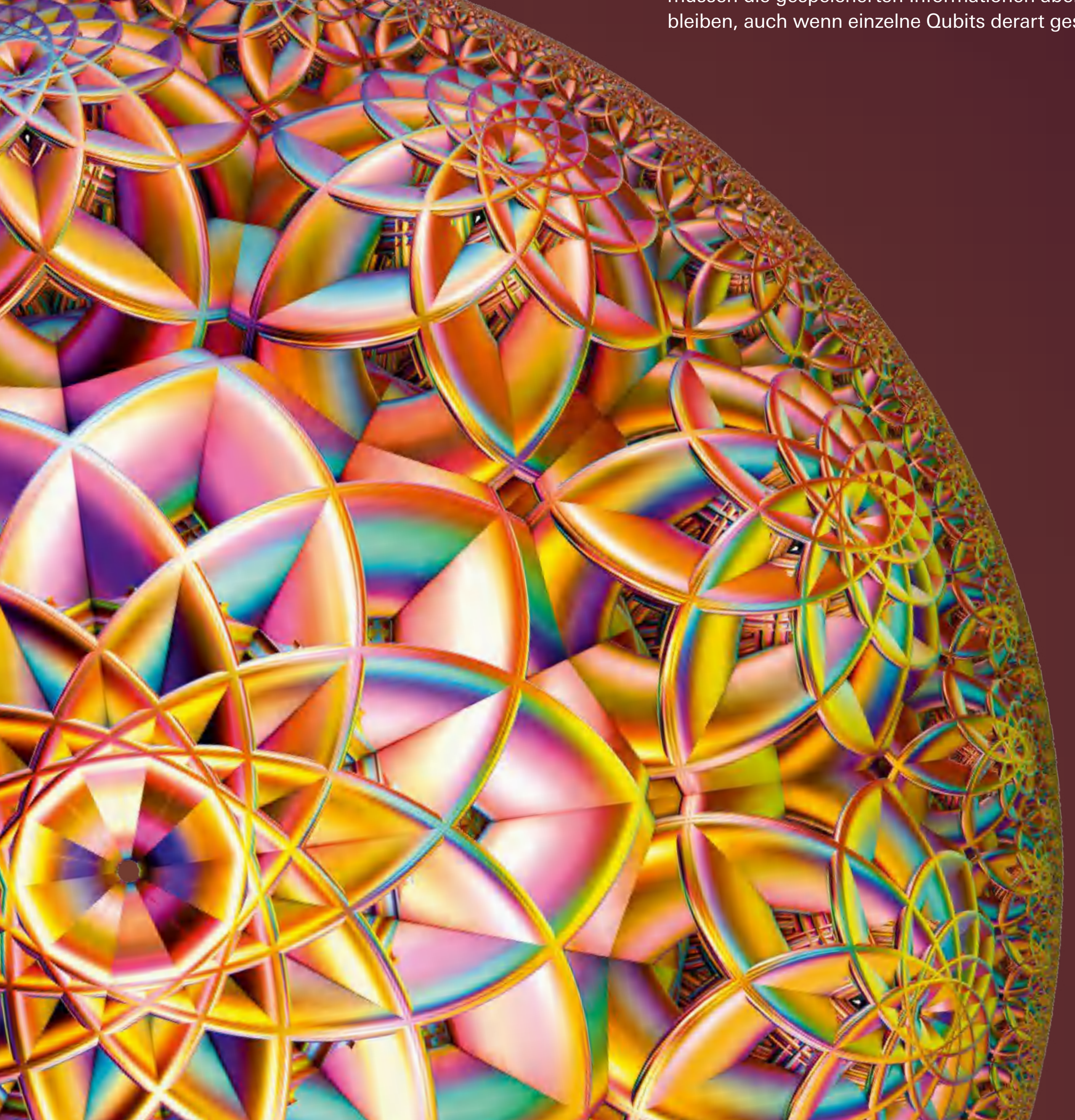
2. Vergleichbare Prinzipien festigen unter Umständen das Gefüge von Raum und Zeit. Quantenkorrekturen würden dann beispielsweise paradoxe Phänomene im Zusammenhang mit Schwarzen Löchern erklären.

3. Die bisherigen theoretischen Untersuchungen dazu funktionieren nur in einem Kosmos mit anderer Geometrie als beim realen All. Physiker wollen einige Erkenntnisse dennoch darauf übertragen.

1994 waren Quantencomputer plötzlich in aller Munde. Der US-Mathematiker Peter Shor hatte gerade gezeigt, wie die Geräte im Prinzip moderne Kryptografieverfahren knacken können, indem sie große Zahlen sehr schnell in ihre Faktoren zerlegen. Quantencomputer waren seinerzeit rein hypothetisch, und ihrer Konstruktion stand vor allem ein grundlegendes Problem im Weg: die Empfindlichkeit der physikalischen Bauteile.

Im Gegensatz zu den binären Bits in gewöhnlichen Rechnern bestehen diese »Qubits« aus Quantenobjekten. Ihr Wert liegt nicht fest, sondern es lassen sich bis zum Zeitpunkt der Messung nur Wahrscheinlichkeiten angeben, ein Qubit in einem der Zustände |0⟩ oder |1⟩ anzutreffen. Außerdem können sich die noch ungewissen Zustände zweier Qubits aneinanderkoppeln, sie sind daraufhin »verschränkt«. Dann hängen die möglichen Zustände jedes Qubits von denjenigen aller anderen ab. Mit jeder Rechenoperation wird das verfügbare Kontingent unterschiedlicher Wahrscheinlichkeiten größer. Die Anzahl all dieser gleichzeitig vorliegenden Einstellungen wächst exponentiell. Wenn es gelingt, sie zu erhalten und zu manipulieren, macht das Quantencomputer enorm leistungsfähig – zumindest theoretisch.

Doch Qubits sind extrem anfällig für Fehler. Schon ein schwaches Magnetfeld oder ein von außen einfallender Strahlungsimpuls können etwa zu einem »Bit-Flip« führen, einem Austausch der Wahrscheinlichkeiten für |0⟩ und |1⟩, oder zu einem »Phasen-Flip«, der das Vorzeichen in der mathematischen Beziehung zwischen den beiden Zuständen umkehrt. Damit Quantencomputer funktionieren, müssen die gespeicherten Informationen aber erhalten bleiben, auch wenn einzelne Qubits derart gestört werden.



Theoretiker benutzen für ihre Untersuchungen oft Modelluniversen mit exotischen Geometrien: Vom Zentrum ausgehend schrumpft in diesen etwa die räumliche Dimension nach außen hin, bis sie am Rand ganz verschwindet.

THOMASLENNE / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr noch: Die Fehler sollen entdeckt und korrigiert werden, ohne die Qubits direkt zu messen. Denn das würde deren zahlreiche Verschränkungen kollabieren lassen. Die Qubits hätten dann statt koexistierender Wahrscheinlichkeiten einen eindeutigen Wert und wären für Quantenberechnungen unnütz.

Shor ließ seinem Faktorisierungsalgorithmus einen zweiten Hammer folgen: 1995 bewies er, dass eine Quantenfehlerkorrektur möglich ist. Kurz darauf zeigten die Informatiker Dorit Aharonov und Michael Ben-Or von der Universität Jerusalem sowie unabhängig davon weitere Forscher, dass entsprechende Verfahren den Fehler theoretisch fast auf null absenken können. »Nach diesen zentralen Erkenntnissen der 1990er Jahre erschienen skalierbare Quantencomputer tatsächlich realistisch. Es war offenbar nur ein Problem der Ingenieurskunst – wenn auch ein atemberaubend schwieriges«, kommentiert der Quanteninformatiker Scott Aaronson von der University of Texas.

Inzwischen gibt es zwar in Laboratorien in aller Welt ein paar kleine Quantencomputer. Nützliche Exemplare, die besser sind als klassische Rechner, liegen gleichwohl noch Jahre oder gar Jahrzehnte in der Zukunft. Die Fehlerraten realer Qubits sind entmutigend hoch, und es werden immer effizientere Korrekturcodes nötig, um damit umzugehen.

Unterdessen sind Physiker auf eine seltsame, tiefe Verbindung zwischen der Quantenfehlerkorrektur und der Natur von Raum, Zeit und Schwerkraft gestoßen. In Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie entspricht die Gravitation einer Krümmung von Raum und Zeit um Massen herum. Aber es ist völlig unklar, wie sich die Struktur der Raumzeit auf quantenmechanischer Ebene herausbildet.

Der programmierte holografische Kosmos

Hier machten drei junge Forscher 2014 eine erstaunliche Entdeckung. Sie arbeiteten auf einer unter Physikern beliebten theoretischen Spielwiese, einem als Anti-de-Sitter-Raum bezeichneten Modelluniversum. Dieses funktioniert wie ein Hologramm: Die gekrümmte Raumzeit im Inneren des Universums ist eine Projektion und stammt von verschränkten Teilchen auf seiner Oberfläche. Ahmed Almheiri vom Institute for Advanced Study in Princeton, Xi Dong von der University of California bei Santa Barbara und Daniel Harlow vom Massachusetts Institute of Technology im US-amerikanischen Cambridge berechneten: Diese »holografische Emergenz« der Raumzeit funktioniert wie eine Quantenfehlerkorrektur. In ihrer Publikation äußerten die drei Forscher daher die Vermutung, dass die Raumzeit selbst ein solches Programm ist – zumindest in einem Anti-de-Sitter-Universum. Die Veröffentlichung der Hypothese löste eine Welle der Aktivität in dem Arbeitsgebiet aus. Seither haben Forscher weitere Quantenfehlerkorrekturprogramme entdeckt, die sogar noch mehr Eigenschaften der Raumzeit widerspiegeln.

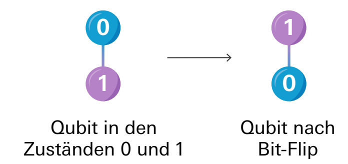
Laut dem theoretischen Physiker John Preskill vom California Institute of Technology kann eine Quantenfehlerkorrektur erklären, warum die Raumzeit so robust ist, obwohl sie aus eigentlich höchst empfindlichen quantenmechanischen Verschränkungen besteht: »Es ist ja nicht so,

Fehlerkorrektur bei Quantenbits

Qubits sind die kleinsten Speichereinheiten in Quantencomputern. Ihre quantenmechanische Überlagerung ermöglicht neuartige Berechnungen, ist allerdings empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Korrekturcodes müssen einzelne, fehlerhafte Qubits indirekt identifizieren, ohne die Überlagerung der verschiedenen Zustände zu zerstören.

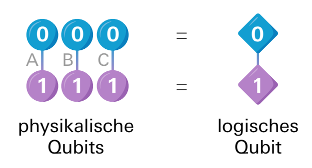
Der Bit-Flip-Fehler

Wenn ein Qubit seine Ausrichtung umkehrt, kann sich das auf die codierte Information auswirken. Doch wollte man das Umklappen des Qubits durch dessen direkte Messung feststellen, würde das die Überlagerung beenden.

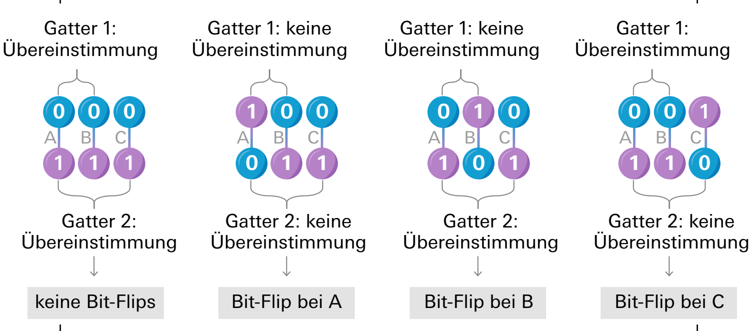


Fehler finden und beseitigen

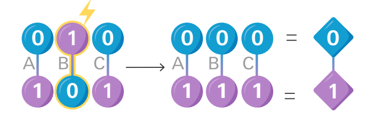
1 Drei physikalische Qubits (einzelne Quantenteilchen A, B und C) speichern eine Information gemeinsam – zusammengefasst als logisches Qubit.



2 Dann lässt sich ein Bit-Flip-Fehler mit Hilfe zweier Quantengatter identifizieren. Hier werden die physikalischen Qubits paarweise verglichen, ohne einzelne direkt zu messen.



3 Ein geeigneter Impuls, etwa in Form von Mikrowellenstrahlung, klappt das betroffene physikalische Qubit wieder um. Das beseitigt den Fehler im logischen Qubit.



LUCY READING-IKKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

als müssten wir uns auf Zehenspitzen bewegen, um die Geometrie der Raumzeit nicht zu zerstören. Die Verbindung mit der Quantenfehlerkorrektur ist meiner Ansicht nach die tiefgründigste Erklärung, die wir dafür haben.«

Mit dem neuen Werkzeug wollen Wissenschaftler auch die Geheimnisse Schwarzer Löcher untersuchen, also jener Regionen im All, in denen die Raumzeit so stark gekrümmt ist, dass nicht einmal Licht aus ihnen entkommen kann. Dort versagt die allgemeine Relativitätstheorie. Almheiri ist zuversichtlich: »Wenn wir begreifen, welchen Code die Raumzeit verwendet, könnte das beim Verständnis des Inneren von Schwarzen Löchern helfen.« Gewissermaßen als Bonus würde das den Weg zu besser skalierbaren Quantencomputern weisen. »Die Raumzeit ist viel klüger als wir«, meint der Physiker, »und die Fehlerkorrektur ist bei so einer Konstruktion höchst effizient programmiert.«

Der Trick, die Information in den fragilen Qubits zu behalten: Codes zur Quantenfehlerkorrektur speichern sie nicht in einzelnen Qubits, sondern verteilt auf viele, die miteinander verschränkt sind. Ein einfaches Beispiel dafür ist ein Code mit drei Qubits (siehe »Fehlerkorrektur bei Quantenbits«, links). Er verwendet drei »physikalische« Qubits, um die Information eines einzigen »logischen« gegen Bit-Flips zu schützen. Dieser Beispielcode bewahrt zwar nicht vor Phasen-Flips und ist deshalb praktisch nicht wirklich nützlich, gleichwohl ist er instruktiv.

Wenn das logische Qubit im Zustand $|0\rangle$ ist, heißt das, alle drei physikalischen Qubits sind ebenfalls im Zustand $|0\rangle$. Gleiches gilt für $|1\rangle$. Das System befindet sich in einer »Superposition«, geschrieben als $|000\rangle+|111\rangle$. Was passiert nun, wenn eines der physikalischen Qubits umklappt? Wie können wir einen solchen Fehler entdecken und korrigieren, ohne auch nur ein Qubit direkt zu messen?

Die Lösung ist, die Qubits durch zwei Gatter in einem Quantenschaltkreis zu schicken. Das erste Gatter prüft die so genannte Parität, das heißt, ob das erste und das zweite physikalische Qubit identisch oder verschieden sind. Das zweite Gatter vergleicht analog das erste und das dritte Qubit (siehe 2 links). Liegt kein Fehler vor, befinden sich alle weiterhin im Zustand $|000\rangle+|111\rangle$. Wenn es jedoch beim ersten Qubit zu einem Bit-Flip gekommen ist, was zum Zustand $|100\rangle+|011\rangle$ führt, dann entdecken beide Gatter eine Differenz. Für einen Bit-Flip des zweiten Qubits und den sich daraus ergebenden Zustands $|010\rangle+|101\rangle$ meldet das erste Gatter einen Unterschied, für einen Bit-Flip des dritten Qubits entsprechend das zweite Gatter. Die Ergebnisse sind eindeutig. Zur Korrektur muss das identifizierte fehlerhafte Qubit umgeklappt werden, ohne den Zustand des logischen Qubits kollabieren zu lassen.

Die besten Quantenfehlerkorrekturcodes können typischerweise die gesamte codierte Information aus gerade einmal etwas mehr als der Hälfte der physikalischen Qubits zurückgewinnen – selbst wenn der Rest fehlerhaft ist. Diese Tatsache brachte Almheiri, Dong und Harlow 2014 auf die entscheidende Idee: Die Quantenfehlerkorrektur könnte damit zusammenhängen, wie sich die Raumzeit in einem Anti-de-Sitter-Raum aus der Verschränkung ergibt.

Ein Anti-de-Sitter-Raum unterscheidet sich wesentlich von der Raumzeit-Geometrie unseres realen Universums, welches ein De-Sitter-Raum ist. Unser Kosmos dehnt sich ungebremst aus. Mathematisch entspricht das einer positiven Energie des Vakuums. Unterdessen besitzt der Anti-de-Sitter-Raum eine negative Vakuumenergie und eine seltsame »hyperbolische Geometrie«: Vom Zentrum eines Anti-de-Sitter-Raums ausgehend schrumpft die räumliche Dimension nach außen hin und verschwindet schließlich. Das definiert den Rand eines solchen Universums. Der Anti-de-Sitter-Raum gewann 1997 an Popularität. In jenem Jahr wies der argentinische Physiker Juan Maldacena, der heute am Institute for Advanced Study tätig ist, eine »Dualität« nach – eine holografische Verbindung zwischen der Struktur des gekrümmten Inneren und einer Quantentheorie auf der Oberfläche. Auf dieser bewegen sich die Teilchen in weniger Dimensionen und unterliegen keiner Gravitation.

Bewahrt der Rand des Universums die Raumzeit-Information im Inneren?

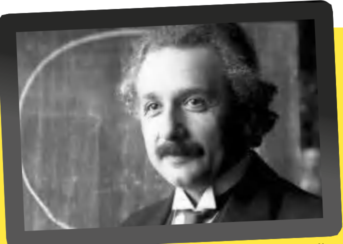
In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben Hunderte von Physikern diese Dualität untersucht. Almheiri und seine Kollegen bemerkten dabei: Jeder Punkt im Inneren des Anti-de-Sitter-Raums lässt sich aus gerade einmal etwas mehr als der Hälfte der begrenzenden Oberfläche rekonstruieren – genauso wie beim bestmöglichen Code zur Quantenfehlerkorrektur!

In ihrer Veröffentlichung spekulieren die Theoretiker daher, die holografische Raumzeit und die Fehlerkorrektur seien ein und dasselbe. Die Forscher führen aus, wie sich selbst ein einfaches Programm als zweidimensionales Hologramm beschreiben lässt. Ein entsprechender Code besteht aus drei »Qutrits«, Teilchen, die drei unterschiedliche Zustände einnehmen können. Sie befinden sich in gleichen Abständen auf einem Kreis. Das verschränkte Trio repräsentiert ein logisches Qutrit, das wiederum einem einzelnen Punkt der Raumzeit in der Kreismitte entspricht (siehe Bild S. 64, unten). Wenn eines der drei Qutrits gelöscht wird, bleibt der Punkt mit Hilfe des Programms dennoch erhalten.

Ein einzelner Punkt ist noch kein ganzes Universum. Doch 2015 fanden Harlow und Preskill zusammen mit Fernando Pastawski und Beni Yoshida vom California Institute of Technology einen weiteren holografischen Code (nach den Anfangsbuchstaben der Forscher HaPPY genannt), der neue Eigenschaften des Anti-de-Sitter-Raums enthüllt. Das Programm unterteilt den Raum in fünfseitige Bausteine. Jedes dieser Elemente repräsentiert einen einzelnen Punkt der Raumzeit. Neben dem HaPPY-Code sind inzwischen weitere holografische Fehlerkorrektur-

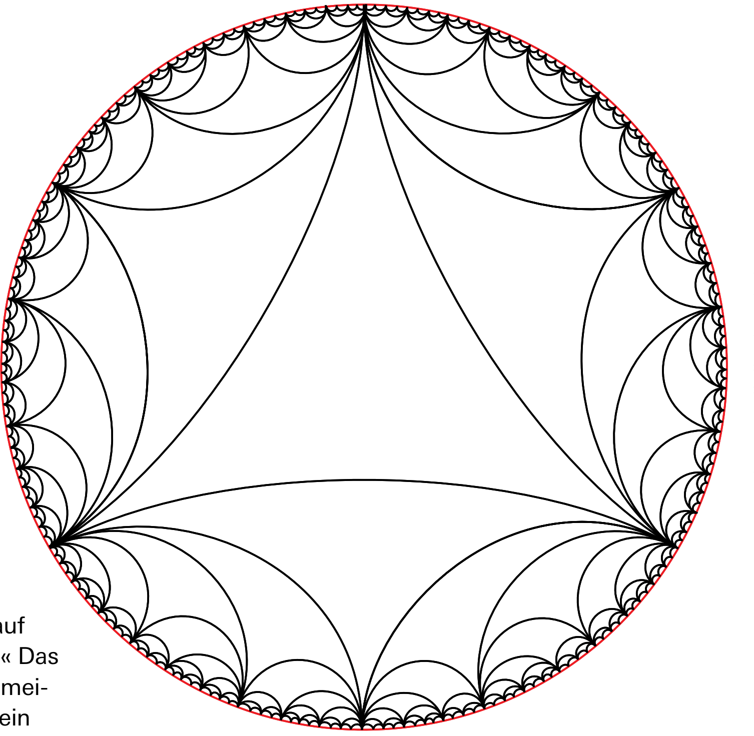
Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/albert-einstein-und-die-relativitaetstheorie**



FERDINAND SCHMUTZER, 1921 / PUBLIC DOMAIN

Die Ebene eines Raums mit hyperbolischer Geometrie lässt sich in eine Kreisscheibe packen. Dort hängt der Längenmaßstab vom Ort ab, und Bewohnern erscheint der Rand (rot) ihrer Welt unendlich weit entfernt.



programme entdeckt worden. Damit lässt sich alles, was sich innerhalb einer Verschränkungskeil genannten Region des inneren Raums befindet, aus Qubits rekonstruieren, die sich auf der Begrenzungsfläche befinden. Sich überschneidende Regionen auf der Oberfläche entsprechen überlappenden Verschränkungskeilen. Patrick Hayden von der Stanford University zieht Parallelen zur Situation, in der sich logische Qubits in einem Quantencomputer aus vielen Untermengen physikalischer Qubits reproduzieren lassen: »Genau hier spielt dann die Quantenfehlerkorrektur eine Rolle.«

Preskill meint: »Mit diesem Programm können wir auf umfassendere Weise über die Geometrie nachdenken.« Das gleiche Prinzip sollte, so der Physiker weiter, »auf allgemeinere Situationen anwendbar sein« – insbesondere auf ein De-Sitter-Universum wie unseres. Das ist indessen durch keine Fläche nach außen begrenzt. Es ist daher erheblich schwieriger, sich einen solchen Kosmos als Hologramm vorzustellen.

Vorerst beschäftigen sich Almheiri, Harlow und Hayden weiter mit dem Anti-de-Sitter-Raum. Immerhin teilt er viele essenzielle Eigenschaften mit dem De-Sitter-Raum. Beide Raumzeit-Geometrien folgen den Regeln der allgemeinen Relativitätstheorie, sie sind nur in entgegengesetzte Richtungen gekrümmt. Wichtiger noch: Beide enthalten Schwarze Löcher. »Die Existenz Schwarzer Löcher ist die grundlegendste Eigenschaft der Gravitation«, kommentiert Harlow. »Darin unterscheidet sie sich von allen anderen Kräften. Und genau das macht die Suche nach einer Quantengravitation so schwierig.«

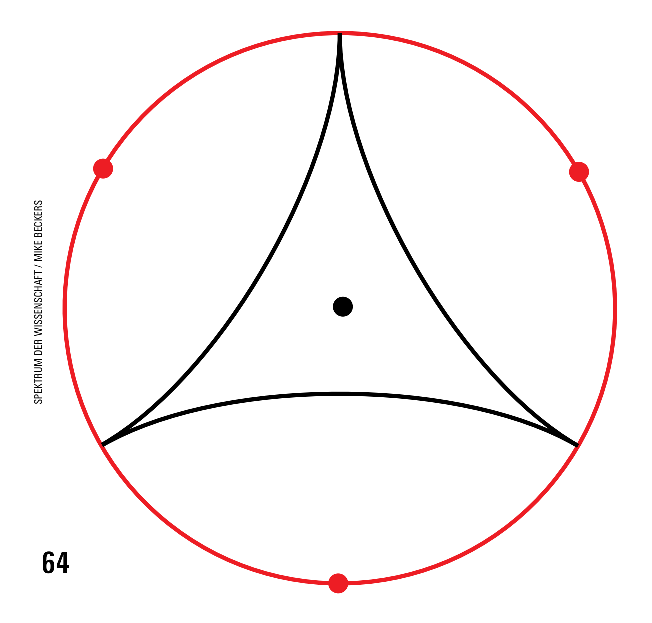
Die Sprache der Quantenfehlerkorrektur hat neue Beschreibungen für ein Schwarzes Loch geliefert. Dessen Anwesenheit entspricht laut Hayden einem »Zusammenbruch der Korrigierbarkeit«. Der Forscher erklärt: »Wenn es so viele Fehler gibt, dass sich nicht länger verfolgen lässt, was in der Raumzeit vorgeht, dann erhält man ein Schwarzes Loch. Es ist eine Art Abfluss ins Ungewisse.«

Das Ungewisse betrifft vor allem das Innenleben Schwarzer Löcher. Stephen Hawking hatte 1974 gezeigt, dass diese Objekte Wärme abstrahlen und deshalb schließlich verdampfen. Was passiert unterdessen mit all der Information, die das Schwarze Loch im Lauf seiner Existenz verschluckt hat? Physiker glauben, erst mit einer Quantentheorie der Gravitation werden sie verstehen, in welcher Form die Dinge, die dort hineingelangen, wieder herauskommen.

Die Feuerwand am Schwarzen Loch

Der Anti-de-Sitter-Raum liefert eine Lösung für das Problem. Seine Begrenzungsfläche ist mit seinem Inneren verknüpft, inklusive etwaiger Schwarzer Löcher. Darum geht die dort einfallende Information niemals verloren, sondern bleibt auf dem Rand holografisch codiert. Berechnungen zeigen: Um die Information im Inneren Schwarzer Löcher aus den Qubits auf der Grenzfläche zu rekonstruieren, benötigt man Zugriff auf verschränkte Qubits von zirka drei Vierteln der Grenzfläche. »Etwas mehr als die Hälfte reicht also nicht mehr aus«, stellt Almheiri fest. Zwar mutmaßt er, das könnte ein wichtiger Hinweis auf die Natur der Quantengravitation sein, gibt aber zu, dass völlig offen sei, warum es gerade drei Viertel sind.

Almheiri und seine Kollegen sorgten 2012 erstmals für Aufsehen. Damals machten sie das Informationsparadoxon noch seltsamer, als es ohnehin bereits war. Ihre Überlegungen deuteten darauf hin, dass Information von einer »Feuer-



In einem Modell codieren verschränkte Qutrits (rote Punkte) auf dem Rand gemeinsam einen Punkt der Raumzeit in der Kreismitte. Auch wenn eines der drei Qutrits gelöscht wird, bleibt der Punkt erhalten.

wand« am Ereignishorizont daran gehindert wird, überhaupt in ein Schwarzes Loch hineinzufallen (siehe »Die Feuerwand am Horizont«, **Spektrum** September 2015, S. 34).

Wie die Mehrheit der Physiker hält auch Almheiri solche Feuerwände um Schwarze Löcher für Gedankenspiele und glaubt nicht, dass es sie tatsächlich gibt – doch es hat sich als schwierig erwiesen, ihre Existenz zu widerlegen. Der Forscher meint, möglicherweise unterbinde die Quantenfehlerkorrektur die Entstehung der Feuerwand, indem sie die Information selbst dann schütze, wenn diese den Ereignishorizont überquert.

In einer im Oktober 2018 erschienenen Arbeit berichtet Almheiri, dass die Quantenfehlerkorrektur essenziell sei, um die Raumzeit am Horizont eines Wurmlochs – ein hypothetisches Objekt aus zwei miteinander verbundenen Schwarzen Löchern – glatt zu erhalten. Er spekuliert außerdem, die Quantenfehlerkorrektur böte einen Weg, wie Qubits aus einem Schwarzen Loch entkommen könnten, nämlich durch Miniwurmlöcher. Deren eine Mündung läge im Inneren, die andere außerhalb des Horizonts.

Es bleibt abzuwarten, ob sich auch De-Sitter-Universen wie das unsere mit Qubits und Codes holografisch beschreiben lassen. »Die Verbindung kennen wir im Augenblick nur für eine Welt, die nicht die unsere ist«, bekräftigt Scott Aaronson.

Im Sommer 2018 unternahmen Dong, die Stanford-Physikerin Eva Silverstein und der Argentinier Gonzalo Torroba einen Schritt in Richtung einer einfachen holografischen Beschreibung des De-Sitter-Raums. Noch ist unklar, ob solche Überlegungen näheren Prüfungen standhalten werden. Dennoch ist Preskill davon überzeugt, dass sich die Sprache der Quantenfehlerkorrektur schließlich auch auf die wirkliche Raumzeit anwenden lassen wird. »Letztlich hält die Verschränkung die Raumzeit zusammen«, ist sich der Forscher sicher. »Wenn man die Raumzeit konstruieren will, muss man ihre Bausteine miteinander verschränken. Und dafür gibt es nur eine richtige Weise: eine Quantenfehlerkorrektur.« ◂

QUELLEN

Almheiri, A. et al.: Black holes: complementarity or firewalls? Journal of High Energy Physics 62, 2013

Almheiri, A.: Holographic quantum error correction and the projected black hole interior. arXiv 1810.02055, 2018

Dong, X. et al.: De Sitter holography and entanglement entropy. Journal of High Energy Physics 50, 2018

Pastawski, F. et al.: Holographic quantum error-correcting codes: Toy models for the bulk/boundary correspondence. Journal of High Energy Physics 149, 2015

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »How Space and Time Could Be a Quantum Error-Correcting Code« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft



UNSPLASH / MAE MU (https://unsplash.com/photos/Pvclb-iHHYY)



PHYSIK IN THEORIE UND PRAXIS

Pasta, Pomodori, Parmigiano: Physik pur

In einem Vortrag geht es um die molekulare Welt des Geschmacks und Fragen wie: Was ist al dente, und woran bemisst sich die Kochzeit? Warum müssen Soßen lange köcheln, und verhindert Fett das Zusammenkleben der Pasta? In der Praxis werden unter professioneller Anleitung Pastagerichte aus zwei verschiedenen Teigen für ein gemeinsames Abendessen zubereitet.

Infos und Anmeldung:
Spektrum.de/live

PHYSIK

DIE MIKROSKOPIE-REVOLUTION

Ausgeklügelte Technologien haben die Elektronenmikroskopie in den letzten Jahren stark vorangebracht. Das hat Forschern auf Ebene der Atome und Moleküle reichlich Überraschungen und ungeahnte Möglichkeiten beschert.



Rachel Courtland ist Redakteurin bei »Nature« in New York.

spektrum.de/artikel/1661448

Ohne Messergebnisse können Naturwissenschaftler nicht forschen, wie David Muller von der Cornell University in New York nur zu gut weiß. Als Experimentalphysiker ist er an der atomaren Zusammensetzung von Materialien interessiert und stößt dabei immer wieder an die Grenzen der Bildgebung.

Als besonders problematisch erwiesen sich ultradünne Schichten von Molybdändisulfid (MoS_2), aktueller Hoffnungsträger in der Mikroelektronikindustrie. Wie bei Graphen lassen sich zweidimensionale MoS_2-Lagen herstellen, die viel versprechende elektronische Eigenschaften besitzen. Beispielsweise könnten sie noch kleinere Transistoren ermöglichen, was zu leistungsfähigeren Computerchips führen würde. Als Muller und seine Kollegen die erstaunlichen Halbleiter genauer untersuchen wollten, konnten sie allerdings selbst mit den besten Elektronenmikroskopen (siehe »Elektronenmikroskop«, S. 70 oben) die Schwefelatome der MoS_2-Proben kaum erkennen. Es ließ sich bloß erahnen, ob man eine reine Probe vor sich hatte oder ob sich Fremdatome in das Material geschlichen hatten.

Im Juli 2018 wendete sich das Blatt jedoch: Das Team um Muller entwickelte einen Detektor, der MoS_2-Schichten mehr als doppelt so gut auflöst wie bisherige Geräte. Während gewöhnliche Elektronenmikroskope die empfindliche Probe auf gerade einmal 100 Pikometer (10^{-10} Meter) genau abbilden, was etwa der Größe eines Atoms entspricht, hat der neue Apparat eine Auflösung von 39 Pikometern. Auf den Bildern stechen ehemals unscharfe Schwefelatome deutlich heraus, ebenso wie die Löcher, an denen sie fehlen (siehe Aufnahmen auf S. 68).

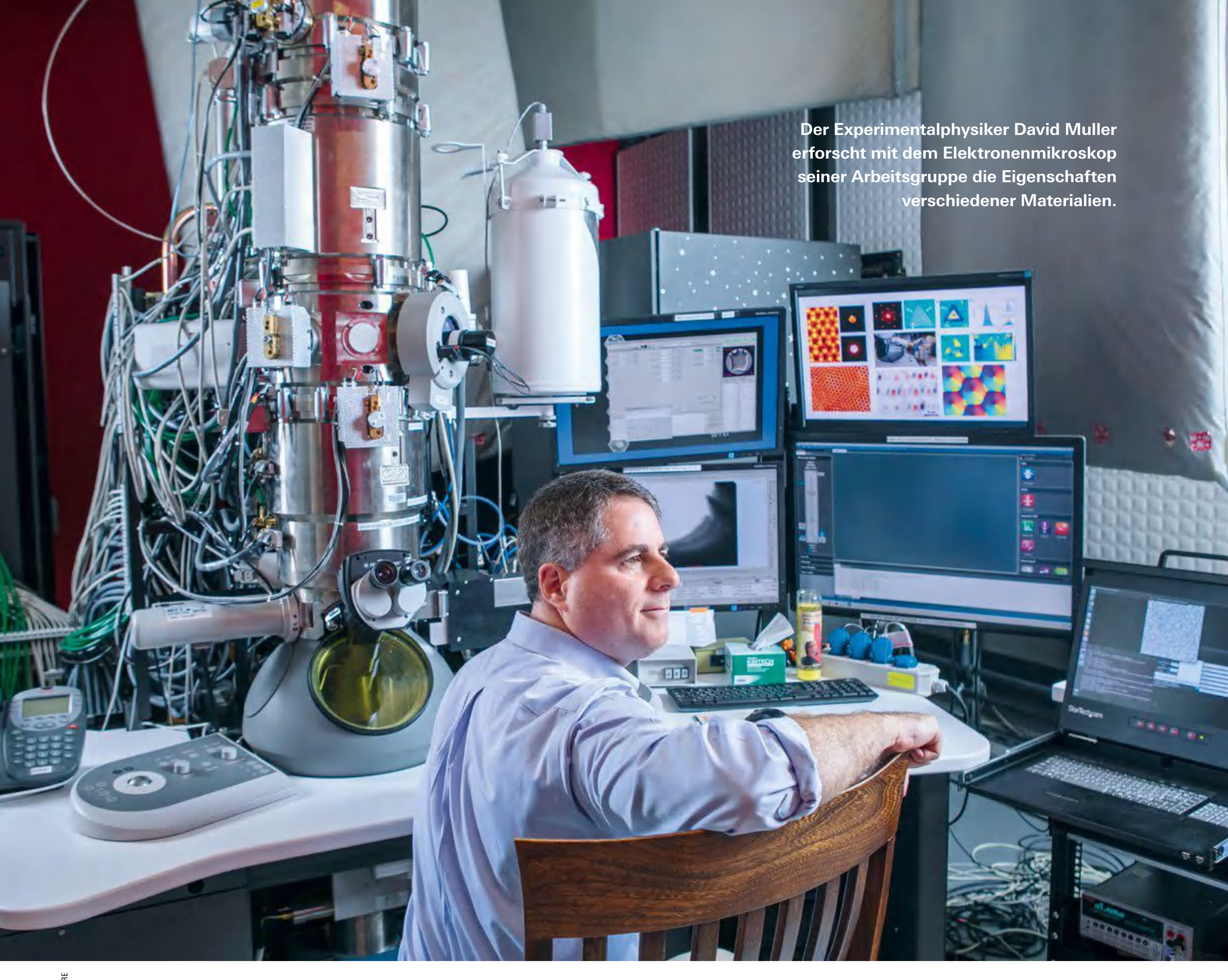
Das ist nur einer von vielen aktuellen Fortschritten, welche die Elektronenmikroskopie in den letzten Jahren revolutioniert haben. Nicht allein die hoch aufgelösten Bilder begeistern die Forscher. Die neuen Entwicklungen ermöglichen es auch, bisher unsichtbare Eigenschaften von Materialien zu untersuchen, etwa magnetische Felder oder kleinste Vibrationen in Kristallen. Einige Wissenschaftler verwandeln die luftleeren Innenräume ihrer Elektronenmikroskope sogar in winzige Labore, in denen sie Proben unterschiedlichen Flüssigkeiten, Gasen oder Temperaturen aussetzen.

AUF EINEN BLICK
NEUE AUGEN FÜR DIE WISSENSCHAFT

1 Elektronenmikroskope haben sich seit ihrer Erfindung in den 1930er Jahren in der Funktionsweise kaum verändert. Dennoch hat sich ihr Auflösungsvermögen seither um den Faktor 1000 verbessert.

2 In den letzten Jahren haben Forscher erstaunliche Fortschritte gemacht. Nun können sie auch höchst empfindliche, etwa biologische Materialien untersuchen.

3 Von den Entwicklungen profitieren viele Bereiche – von der Batterieentwicklung über die Polymerforschung bis hin zu Quantencomputern.



Der Experimentalphysiker David Muller erforscht mit dem Elektronenmikroskop seiner Arbeitsgruppe die Eigenschaften verschiedener Materialien.

JESSE WINTER FÜR NATURE

Die technischen Neuerungen haben in der Biologie bereits zu großen Erfolgen geführt: Sie enthüllten Details über den Aufbau von Proteinen und anderen Substanzen, die sonst überhaupt nicht oder nur mit enormem Zeitaufwand zu messen wären. Forscher anderer Fachbereiche fangen jetzt erst an, die Vorteile der neuen Technologien zu nutzen. Der Grund dafür ist, dass »sie lange brauchten, um herauszufinden, was überhaupt alles möglich ist«, erklärt Haimei Zheng, Materialwissenschaftlerin am Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien.

Elektronen statt Photonen

Doch was steckt hinter den technischen Entwicklungen? Seit das erste Elektronenmikroskop in den 1930er Jahren eingeführt wurde, hat sich an der Funktionsweise kaum etwas verändert. In den gigantischen, raumfüllenden Messgeräten sausen immer noch Elektronenstrahlen mit irrwitzigen Geschwindigkeiten durch eine Probe und treffen dann auf einen Detektor, aus dessen Messergebnissen sich die Struktur der Probe rekonstruieren lässt. Weil die Wellenlänge hochenergetischer Elektronen kleiner ist als die von Licht, können Wissenschaftler so mikroskopische Details bis zu einem Bruchteil eines Atomdurchmessers erkennen. Das ist mit gewöhnlichen Lichtmikroskopen unmöglich.

Obwohl der grundlegende Aufbau der Geräte gleich geblieben ist, hat sich ihre Auflösung inzwischen um den Faktor 1000 verbessert. Vor allem die vor rund 20 Jahren eingeführten »Aberrationskorrektoren«, die Verzerrungen im Elektronenstrahl durch geeignet platzierte Magnete ausgleichen, ermöglichten es, die Grenze eines Atomdurchmessers zu knacken. »Für Materialwissenschaftler waren Aberrationskorrektoren eine Revolution«, erinnert sich Muller. »Man kann damit nicht nur jede Art von Atom erkennen, sondern auch viel schneller arbeiten als vorher.« Um die Technik voll auszunutzen, muss man die Proben allerdings intensiven Elektronenstrahlen aussetzen, die empfindliche Materialien, einschließlich aller biologischen, stark beschädigen.

Biologen setzten deswegen auf eine andere Methode: Statt die Energie der Elektronen zu erhöhen, verbesserten sie den Detektor, der sie registriert (siehe »Die Augen der Elektronenmikroskope«, S. 70 unten). Lange Zeit nutzte man dafür CCD-Kameras, die aus so genannten Szintilla-

tionsdetektoren bestehen. Diese wandeln die eintreffenden Teilchen zuerst in Photonen um und messen diese erst danach, was nicht sonderlich effizient ist und unscharfe Resultate bringt. Anfang 2010 kamen jedoch direkte Elektronendetektoren auf den Markt, welche die einfallenden Teilchen ohne Umweg messen und selbst aus schwachen Strömen klare Bilder erzeugen.

Die Forscher mussten jedoch eine weitere Hürde überwinden. Normalerweise enthalten biologische Proben Wasser, das in der unwirtlichen Vakuumkammer eines Elektronenmikroskops sofort verdampft. Vom Untersuchungsgegenstand bleibt dann bloß eine verschrumpelte Hülle zurück, die kaum etwas mit dem ursprünglichen Objekt gemein hat. Der luftleere Raum ist aber notwendig, damit die Elektronenstrahlen nicht an den Luftmolekülen gestreut und dadurch abgelenkt werden. Eine Lösung bietet die Kryoelektronenmikroskopie (Kryo-EM), bei der man die Proben zuvor schockfrostet, so dass sie im Vakuum in Form bleiben. Indem Biologen die Methode mit direkten Elektronendetektoren verbanden, konnten sie inzwischen zahlreiche Moleküle beleuchten, was den drei Pionieren der Kryo-EM 2017 den Nobelpreis für Chemie einbrachte (siehe **Spektrum** Dezember 2017, S. 20).

Metalle wie Schweizer Käse

Auch andere Forscher nutzen den Umstand, dass direkte Elektronendetektoren mit schwachen Strömen auskommen. Das ermöglicht ihnen, empfindliche Festkörper zu untersuchen, etwa so genannte metallorganische Gerüste (englisch: metal-organic frameworks, kurz: MOFs). Weil die Materialien von etlichen mikroskopischen Löchern durchsetzt sind, haben sie eine erstaunlich große Oberfläche: Diese kann bei bloß einem Gramm eines solchen Materials bereits bis zu 12000 Quadratmeter messen! Die vielen winzigen Löcher eignen sich besonders gut dazu, Gase einzufangen. Dadurch könnte man mit MOFs Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre einfangen oder Wasserstoff für Antriebe speichern.

Allerdings waren die ersten direkten Elektronendetektoren nicht für alle Anwendungen geeignet. Die Geräte sind extrem empfindlich, so dass sie lediglich wenigen Elektronen pro Pixel standhalten, ohne beschädigt zu werden. Für gewöhnlich sind Materialwissenschaftler jedoch auf intensive Teilchenstrahlen angewiesen, um kleinste Strukturen in Kristallen auszumachen. Meist verwenden sie dafür eine spezielle Variante der Elektronenmikroskope, die Rastertransmissionselektronenmikroskope (RTEM).

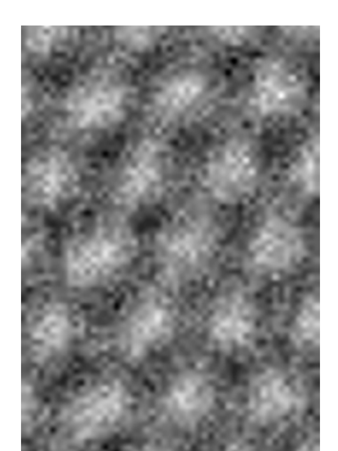
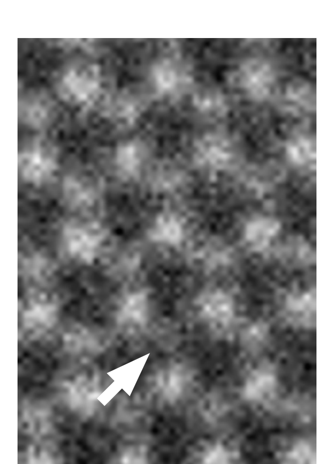
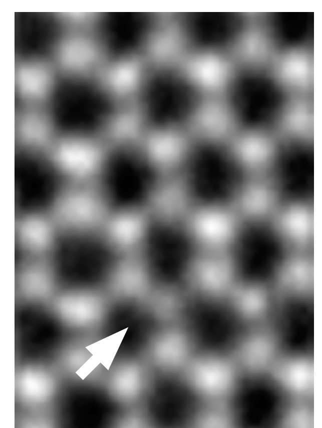
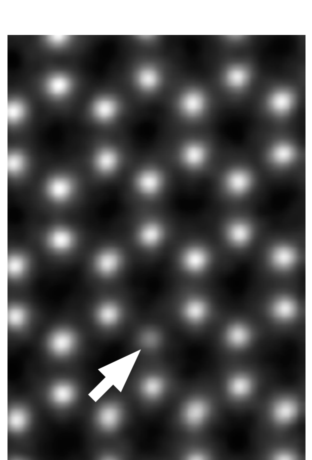
Solche Geräte bündeln die Elektronen in einem winzigen Strahl, mit dem man die Probe rasterförmig abfährt (siehe »Elektronen im Raster«, S. 71). Während die meisten der blitzschnellen Teilchen das Material ungehindert passieren, werden einzelne Partikel abgelenkt. Um auf die genaue Struktur der Probe zu schließen, ist es entscheidend, beide Signale genau zu erfassen. Ein geeigneter Detektor muss daher in der Lage sein, gestrandete Teilchen und gleichzeitig eine Sturmflut aus Elektronen zu registrieren. Muller vergleicht die Situation mit einem Bild, das man an einem sonnigen Tag aufnimmt: »Es ist, als wolle man alle Sonnenflecken der Sonne darstellen und gleichzeitig ein Gesicht, das sich im Schatten eines Baums befindet.«

Eine neue Art von Detektor musste also her. Um 2010 entwickelten Muller und sein Team einen »Elektronenmikroskop-Pixel-Array-Detektor« (EMPAD), der nicht nur den Ort der auftreffenden Teilchen, sondern unter anderem auch ihren Winkel aufnimmt (siehe »Die Augen der Elektronenmikroskope«, S. 70 unten). Dadurch können die Forscher um Muller mit einem selbst entwickelten Computerprogramm den Impuls und die Energie der Elektronen berechnen, was viele weitere Eigenschaften der Probe enthüllt. Auf diese Weise gelang es ihnen 2018, die widerspenstigen MoS_2-Schichten klar abzubilden.

Der EMPAD liefert den Forschern aber nicht nur scharfe Bilder, sondern gibt darüber hinaus noch viel mehr über eine Probe preis. Zum Beispiel kann man die gesammelten Daten nutzen, um elektrische und magnetische Felder eines Materials darzustellen, die den Elektronenstrahl auf seinem Weg ablenken – was mit anderen Verfahren kaum zu bewerkstelligen ist. Muller möchte sich in dem Zusammenhang so genannten Skyrmionen widmen. Die nanometergroßen magnetischen Wirbel könnten eine neue Form der Datenspeicherung ermöglichen (siehe **Spektrum** Oktober 2013, S. 22).

Wegen ihrer extremen Empfindlichkeit und erstaunlichen Schnelligkeit, die 1000 Bilder pro Sekunde übersteigt, erregen die neuen direkten Elektronendetektoren auch das Interesse von Forschern anderer Fachbereiche. Anstatt bloß starre Strukturen im Hochvakuum zu untersuchen, variieren sie die Umgebungstemperatur, üben Zug und Druck auf Materialien aus, fügen Gase hinzu und erforschen sogar Flüssigkeiten.

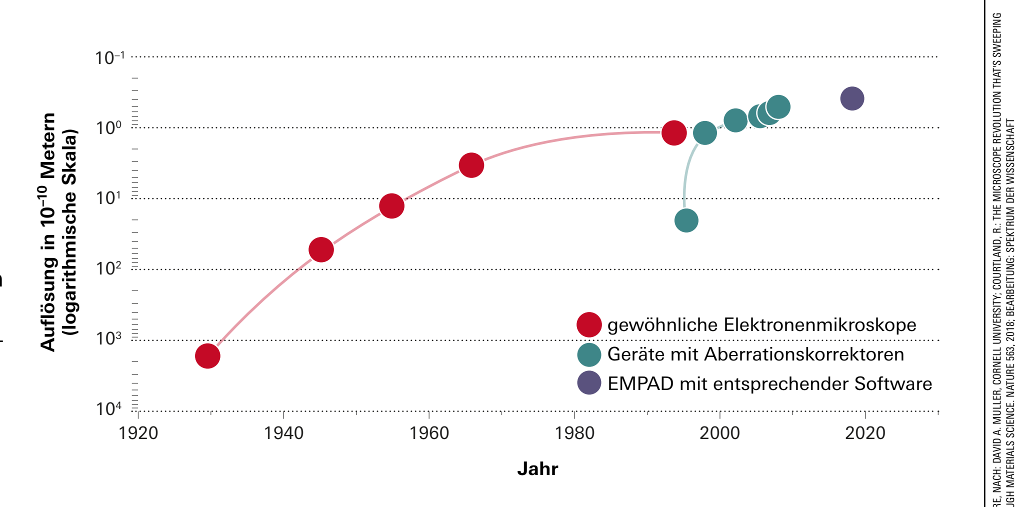
Um die atomare Zusammensetzung einer Molybdändisulfidschicht zu untersuchen, brauchen Forscher hoch aufgelöste Bilder. Erst im ganz rechten Bild, das bis zu 39 Pikometer genau abbildet, wird deutlich, dass sich an einer Stelle nur ein Schwefelatom befindet, wo eigentlich zwei sein sollten (siehe Pfeil).

JIANG, Y. ET AL.: ELECTRON PTYCHOGRAPHY OF 2D MATERIALS TO DEEP SUB-ÅNGSTROM RESOLUTION. NATURE 559, 2018, FIG. 2 A-D

Der Weg zu höherer Auflösung

Seit ihrer Einführung in den 1930er Jahren hat sich die Auflösung der Elektronenmikroskope um den Faktor 1000 verbessert. Die verschiedenfarbigen Punkte stehen für neue Methoden, die zu den erstaunlichen Fortschritten führten.



NATURE, NACH: DAVID A. MULLER, CORNELL UNIVERSITY; COURTLAND, R.: THE MICROSCOPE REVOLUTION THAT'S SWEEPING THROUGH MATERIALS SCIENCE. NATURE 563, 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Materialwissenschaftlerin Frances Ross schloss bereits Anfang der 2000er Jahre mit ihren damaligen Kollegen bei IBM verschiedene Lösungen zwischen zwei Siliziumnitridschichten ein, die dünn genug waren, um Elektronenstrahlen fast ungehindert durchzulassen. Dadurch streuen die Teilchen nur an der Flüssigkeit, auf den entstehenden Bildern ist die Siliziumnitridschicht nicht sichtbar. Wissenschaftler verwenden für solche »flüssigen Zellen« inzwischen auch andere Materialien wie Graphen als quasi durchsichtige Behälter. Viele dieser Gedanken sind nicht neu, betont Ross, die heute am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge arbeitet. Als sie alte Veröffentlichungen durchsah, stieß sie auf Arbeiten aus den 1940er Jahren, in denen es darum ging, wie man Wasser zwischen zwei dünnen Schichten beschreibt. »Damals verfügten die Wissenschaftler allerdings noch nicht über die nötigen Materialien und Herstellungstechniken, um ihre Ideen zu verwirklichen«, erklärt sie.

Aufschlussreiche Einblicke in das Innenleben von Batterien

Inzwischen boomt der Forschungsbereich. An der University of California in Berkeley leitet beispielsweise die Materialwissenschaftlerin Haimei Zheng ein Multi-Millionen-Dollar-Programm des US-Energieministeriums, das sich flüssigen Zellen widmet. Zhengs Hauptinteresse gilt dabei Batterien. An der Grenzfläche zwischen Anode und Elektrolytflüssigkeit können in Lithium-Ionen-Batterien etwa kleine Metallfilamente entstehen, die im schlimmsten Fall zu einem Kurzschluss und damit zu einer Explosion führen. Durch ihre Arbeit hofft die Materialwissenschaftlerin neue Zusammensetzungen zu finden, die zu leistungsstarken und sicheren Batterien führen. Ihre Herangehensweise unterscheidet sich von dem in der Branche sonst üblichen Ansatz, bei dem man Miniaturversionen von Batterien konstruiert, so genannte Knopfzellen, um zu testen, wie ein Stoffensemble funktioniert. »Man weiß nicht genau, was in den Knopfzellen vor sich geht. Sie sind wie eine Blackbox«, erklärt Zheng. »Flüssige Zellen hingegen gewähren uns einen Einblick in das dunkle Treiben.«

Andere Wissenschaftler nutzen flüssige Zellen, um biologische Systeme zu untersuchen. An der Technischen Universität Eindhoven sind Nico Sommerdijk und sein Team etwa daran interessiert, wie Vesikel in organischen Zellen entstehen. Eine netzartige Hülle aus Proteinen umgibt diese flüssigkeitsgefüllten Bläschen, die für den Transport vieler Stoffe in der Zelle verantwortlich sind. Mit Hilfe eines Elektronenmikroskops haben die Forscher Anfang 2019 ein Polymer abgebildet, das sich in einer Flüssigkeit zu einem künstlichen Vesikel zusammenfügt. In einer weiteren Studie beobachteten sie, wie Polymere Kalzium binden. Sie hoffen dadurch die Perlmuttbildung in Meerestieren besser zu verstehen.

Allerdings gibt es bei der Erforschung flüssiger Zellen noch viele Hindernisse, welche die Forscher künftig überwinden müssen. Laut Jim De Yoreo vom Pacific Northwest National Laboratory in Washington ist eines der größten Probleme, dass die intensiven Elektronenstrahlen in Wasser und organischen Lösungen geladene Radikale erzeugen, die Proben zerstören, ihren pH-Wert verschieben oder andere unbeabsichtigte Reaktionen verursachen.

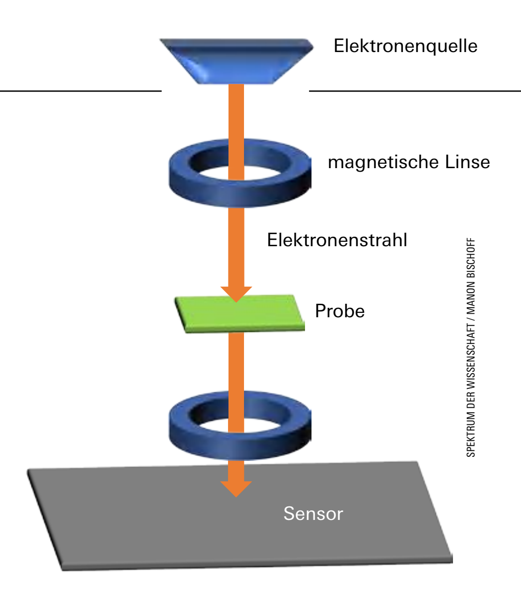
Die Materialwissenschaftlerin Patricia Abellan von SuperSTEM, einem Forschungszentrum für Mikroskopie im britischen Daresbury, profitiert dagegen sogar von den heftigen Wirkungen des Elektronenstrahls. Zusammen mit ihren Kollegen möchte sie herausfinden, wie Flüssigkeiten und Nanomaterialien auf Radioaktivität reagieren. Ihre Ergebnisse sind vor allem für die Industrie interessant, wo beispielsweise bei der Klebebandherstellung Kunststoffe mit Elektronenstrahlen vernetzt werden. Dabei ist es wichtig zu verstehen, was genau auf mikroskopischer Ebene passiert. Zudem untersucht Abellan, wie man die verheerenden Folgen der Strahlen eindämmen kann. Eine Möglichkeit wäre etwa, bestimmte Lösungsmittel wie Toluol zu verwenden.

Auch Nigel Browning von der University of Liverpool möchte herausfinden, wie man den Elektronenstrahl eines RTEM steuern kann, um die Schäden an einer Probe möglichst gering zu halten. Anstatt ein Material rasterförmig abzufahren, bestrahlt er gezielt nur einzelne Punkte eines

Elektronenmikroskop

Statt Licht verwenden Elektronenmikroskope (EM) Elektronen, um Objekte abzubilden. Die Idee dahinter basiert auf dem Welle-Teilchen-Dualismus der Quantenmechanik: Jedes Teilchen hat eine Wellenlänge, die umgekehrt proportional zu seiner Energie ist. Das heißt, je höher die Energie der Elektronen, desto kleiner ist ihre Wellenlänge, was es Wissenschaftlern erlaubt, selbst einzelne Atome einer Probe abzubilden.

Im Elektronenmikroskop passieren die Teilchen (orange) einen luftleeren Raum, damit sie nicht abgelenkt werden, und treffen dann auf eine möglichst dünne Probe (grün). Einzelne Elektronen streuen an den Atomkernen der Probe, wodurch sie ihre Bewegungsrichtung ändern. Am Ende erreichen sie einen Sensor (grau), aus dessen Daten sich die mikroskopische Struktur der Probe rekonstruieren lässt.



Die Augen der Elektronenmikroskope

Lange verwendete man Szintillationsdetektoren, um Teilchenstrahlen in Elektronenmikroskopen zu registrieren. Die Sensoren bestehen aus einem Kristall, der die Energie eines Elektrons aufnimmt und in einen Lichtblitz umwandelt. Linsen bündeln diese Strahlen auf eine CCD-Kamera, die aus Fotodioden besteht. Die Dioden wandeln die Photonen in elektrische Ladungen um und erzeugen einen Stromfluss proportional zur Energie des Lichtstrahls.

Doch warum so umständlich? Könnte man nicht einfach den Kristall und die Fotodioden weglassen, um die Elektronen direkt zu detektieren? Leider ist das nicht so einfach, wie es klingt. Das Problem liegt in der hohen Energie der Teilchen, der gewöhnliche Detektoren nicht lange standhalten – nach nur wenigen Messungen muss man sie ersetzen. Die indirekten Detektoren bergen aber leider den Nachteil, dass manche Elektronen am Kristall streuen, wodurch das Bild einer Probe verschmiert.

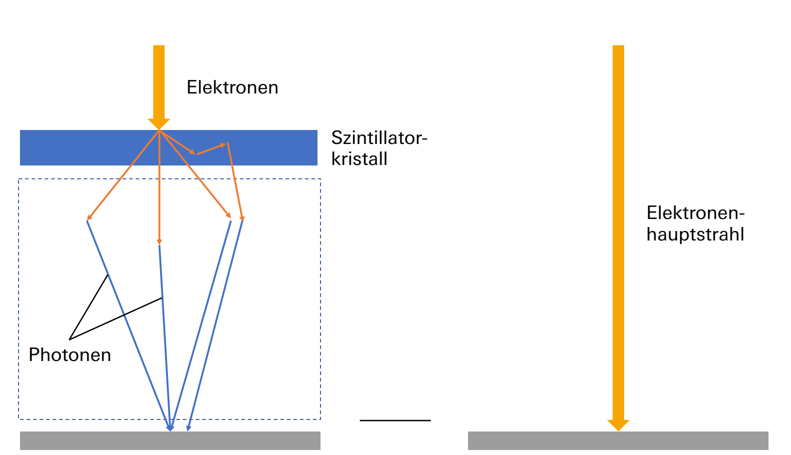
Abhilfe schafft ein Halbleiterelement: der »complementary metal-oxide-semiconductor« (CMOS), den der US-amerikanische Ingenieur Frank Wanlass bereits 1963 entdeckte. Weil es damals allerdings extrem aufwändig war, den Stoff herzustellen, dauerte es über 30 Jahre, bis er seinen Weg in die Industrie fand.

Ähnlich wie eine CCD-Kamera besteht ein CMOS-Sensor aus einzelnen Pixeln, die Strahlung vermessen. Das Bauteil ist jedoch wesentlich robuster, so dass es ein Bombardement mit hochenergetischen Elektronen übersteht. Ohne den Umweg über einen Szintillationsdetektor ergeben sich deutlich schärfere Bilder. Allerdings haben seine Pixel einen geringen Dynamikumfang – das heißt, sie können lediglich eine schmale Bandbreite an Elektronenenergien vermessen.

David Muller und sein Team entwickelten deshalb einen »electron microscope pixel array detector« (EMPAD), der sowohl einzelne Teilchen als auch riesige Elektronenströme handhabt, was insbesondere für die Rastertransmissionselektronenmikroskopie wichtig ist.

Bei der gewöhnlichen Elektronenmikroskopie bezieht man die Information entweder nur aus dem Hauptstrahl der nicht abgelenkten Elektronen oder allein aus den gestreuten Teilchen. Der zu messende Strom ist in beiden Fällen relativ konstant. Um eine gute Auflösung zu erhalten, braucht man daher bloß möglichst viele Pixel, um den Auftreffort der Elektronen zu detektieren.

Bei der RTEM ist das anders: Die Forscher müssen gleichzeitig gestreute Elektronen und den Hauptstrahl vermessen. Dabei entsteht ein Interferenzmuster, das jedes Pixel im Detektor aufnimmt, so dass jedes die gesamte optische Information der Probe enthält. Das machte sich Mullers Team zu Nutze, indem es an unterschiedlichen Pixeln jeweils andere Eigenschaften der Elektronenstrahlen auslas. So konnte es einen Detektor mit hohem Dynamikumfang konstruieren, dessen Daten nach einer computergestützten Bearbeitung viele verschiedene Eigenschaften eines Materials enthüllen.



Stoffs. Wenn die Orte passend gewählt sind, kann selbst eine winzige Stichprobe für viele Zwecke genügen. Gerade bei der Erforschung flüssiger Zellen könnte sich die Methode als hilfreich erweisen.

Andere nutzen den hochenergetischen Elektronenstrahl eines RTEM wiederum, um Materialien gezielt zu verändern. Anfang 2018 hat zum Beispiel der Physiker Toma Susi von der Universität Wien mit seinem Team ein Siliziumatom auf einer Graphenschicht verschoben. Zwar kann man dazu auch gewöhnliche Rastertunnelmikroskope verwenden, allerdings sind deren Ergebnisse nicht stabil. Sobald sich die Umgebung erwärmt, zerfallen die erzeugten Strukturen. RTEMs arbeiten dagegen mit höherer Energie. »Manipuliert man eine Probe, dann bleibt sie so«, erklärt Susi. Wissenschaftler hoffen, künftig einzelne Atome in dreidimensionalen Materialien zu verschieben. Das würde eine neue Möglichkeit eröffnen, Quantencomputer zu entwickeln.

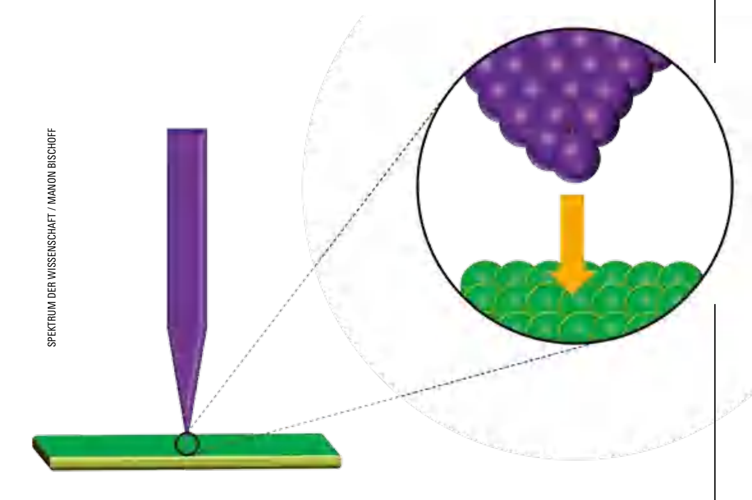
Ein weiterer technischer Fortschritt, der die Elektronenmikroskopie vorangetrieben hat, sind Monochromatoren. Indem sie den Energiebereich der Elektronen scharf eingrenzen, vermögen die Geräte die Eigenschaften einer Probe noch detaillierter zu erfassen. Forscher sind dadurch etwa in der Lage, winzige Schwingungen im atomaren Kristallgitter von Materialien zu detektieren, so genannte Phononen. Ließen sich die Oszillationen auf atomarer Skala abbilden, könnte man genau untersuchen, wie bestimmte Stoffe Strom und Wärme leiten.

In Zukunft möchte Muller Tieftemperaturphysik betreiben. Weil solche Experimente jedoch mehr mechanische Stabilität erfordern, als seine Elektronenmikroskope derzeit haben, muss er sie so anpassen, dass die Geräte auch entsprechend niedrigen Temperaturen standhalten.

Bei all den neuen Technologien auf dem neuesten Stand zu bleiben, ist nicht einfach. Die Messgeräte und -verfahren verändern sich rasend schnell, meint Muller. »Niemand steht still. Jeder denkt darüber nach, was man Neues bauen könnte.« Der nächste große Fortschritt scheint nur eine Frage der Zeit. ◂

Elektronen im Raster

Um das Verfahren der Rastertransmissionselektronenmikroskopie zu erklären, hilft das Prinzip der Rastertunnelmikroskopie. Bei letzterer legt man eine Spannung zwischen einer Probe (grün) und einer hauchdünnen Nadel (lila) an. Anschließend fährt man die Oberfläche der Probe mit der Nadel ab. Wegen der elektrischen Anziehung können Elektronen von der Nadel in die Probe tunneln (orange). Der entstehende Strom variiert mit der Distanz zwischen Nadelspitze und Probe. Auf diese Weise bilden Wissenschaftler die Oberflächenstruktur eines Objekts ab. Andererseits ermöglicht die Methode es, einzelne Teilchen wie ein Atom oder ein Molekül auf einer stark gekühlten Probe zu verschieben.


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Mit Rastertransmissionselektronenmikroskopen (RTEMs) tasten Forscher dagegen eine Probe mit einem gebündelten Elektronenstrahl ab. Einzelne Teilchen streuen an den Atomkernen des Materials, während der Großteil des Strahls die Probe ungehindert passiert. Forscher leiten die innere Struktur des Objekts dabei sowohl aus dem Streumuster der einzelnen Elektronen als auch aus dem Hauptstrahl ab. Daher ist es bei solchen Geräten wichtig, einen Sensor zu benutzen, der einen hohen Dynamikumfang hat.

Ähnlich wie mit Rastertunnelmikroskopen (RTMs) lassen sich mit RTEMs einzelne Atome oder Moleküle auf der Oberfläche einer Probe bewegen. Da diese Geräte aber mit höheren Energien operieren, können sie einzelne Atome selbst auf zweidimensionalen Materialien verschieben, die so robust sind, dass ihnen die energiearmen RTMs nichts anhaben. Die einlagigen Materialschichten sind sogar so stabil, dass sie selbst bei Raumtemperatur ihre Form beibehalten – im Gegensatz zu den Proben, die man bei der herkömmlichen Rastertunnelmikroskopie nutzt.

QUELLEN

Abellan, P. et al.: Gaining control over radiolytic synthesis of uniform sub-3-nanometer palladium nanoparticles: Use of aromatic liquids in the electron microscope. Langmuir 32, 2016

Jiang, Y. et al.: Electron ptychography of 2D materials to deep sub-ångström resolution. Nature 559, 2018

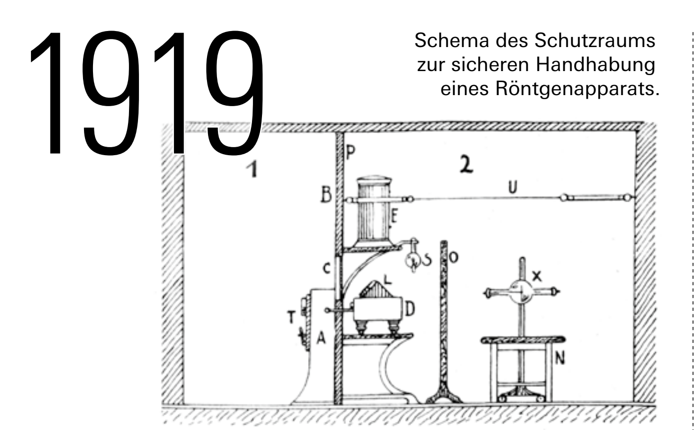
Tripathi, M. et al.: Electron-beam manipulation of silicon dopants in graphene. Nano Letters 18, 2018

Williamson, M.J. et al.: Dynamic microscopy of nanoscale cluster growth at the solid–liquid interface. Nature Materials 2, 2003

Xu, Y. et al.: Microscopic structure of the polymer-induced liquid precursor for calcium carbonate. Nature Communications 9, 2018

nature
© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 563, S. 462–464, 2018

1919



Schema des Schutzraums zur sicheren Handhabung eines Röntgenapparats.

SICHERE BEDIENUNG DES RÖNTGENAPPARATS

»Wegen der schädlichen Wirkungen, die nach der Verwendung von Röntgenstrahlen großer Härte auftreten, wird es neuerdings für unumgänglich notwendig erachtet, daß der, welcher damit arbeitet, von dem Raume, in dem die Strahlen wirken, vollständig getrennt ist. »La Nature« entnimmt den jüngsten erschienenen Werken von Pilou die Beschreibung einer modernen Einrichtung, die vollkommenen Schutz gewährt. Die Abbildung zeigt ihre schematische Anordnung.« *Die Umschau 37, S. 587*

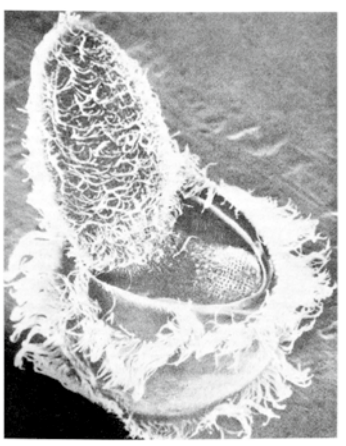
EIN THERMOMETER IM VULKAN

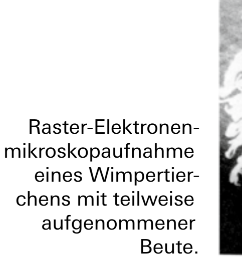
»Messungen über die Temperatur des Kilauea-Lavasees veröffentlichte der Vulkanologe Jaggar. Zur Messung verwandte er unten geschlossene Röhren aus Schmiedeeisen. Am Boden dieser Röhren fanden sich Segerkegel, die aus Silikatgesteinen bestehen, von denen man den Schmelzpunkt kennt. Er fand, daß nach der Tiefe die Temperatur stark zunimmt. Am Boden des 13 m tiefen Lavasees beträgt sie 1200° C. Wenig unter der Oberfläche zeigt sich das Minimum mit 750–850° C.« *Prometheus 1561, S. 416*

GRÖNLAND AUF ABWEGEN

»Die für Grönland vorliegenden Längenbestimmungen weisen merkwürdige Unterschiede auf, die für eine fortschreitende Verschiebung des Landes nach Westen hin sprechen. Die trigonometrischen Netze haben einen gemeinsamen Punkt in der Halbinsel Haystack, dessen Längenbestimmungen in dem Sinne voneinander abweichen, dass Haystack im Jahre 1907 um 1190 m westlicher gemessen wurde als 1870. Daraus folgt eine jährliche Trift des Landes von 32 m. Nach eingehenden Untersuchungen sind die Grundbestimmungen einwandfrei und weisen nur geringe Fehler auf. Zur Erklärung bleibt nur die Hypothese Wegeners übrig, die eine westwärts gerichtete Bewegung des Landes annimmt.« *Prometheus 1558, S. 392*

1969





Raster-Elektronenmikroskopaufnahme eines Wimpertierchens mit teilweise aufgenommener Beute.

WIMPERTIERCHEN UNTER DEM MIKROSKOP

»Eine neue Methode zur Fixierung von Protozoen für Beobachtungen im Raster-Elektronenmikroskop wurde von einer Forschergruppe an der Universität von Illinois entwickelt. Durch diese Fixierungsmethode wird die natürliche Form des Körpers und der Oberflächenorganellen in lebensgetreuer Weise erhalten. Die Technik wurde bei verschiedenen Protozoenarten angewendet und eignet sich auch für andere kleine biologische Objekte.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 9, S. 403*

ALKOHOLRAUSCH IM GEHIRN MARKIERT

»Obwohl der Alkohol schon seit Jahrhunderten dazu dient, die Funktionen des Zentralnervensystems zu beeinflussen, ist bisher unbekannt geblieben, welcher Mechanismus zugrunde liegt. Frühere Untersuchungen haben erbracht, daß der Genuß von Alkohol den Metabolismus der Catecholamine, zu welchen auch Noradrenalin gehört, modifiziert. Radioaktiv markiertes Noradrenalin wurde einem gesunden Mann injiziert und die Nebenprodukte im Urin studiert. Nachdem der Versuchsperson eine Woche lang täglich 560 g Whisky verabreicht worden waren, wurden die Stoffwechselprodukte wiederum geprüft. Als Ergebnis zeigte sich, daß Äthanol eine Wirkung auf den Noradrenalin-Metabolimus des Zentralnervensystems ausübt.« *Die Umschau 19, S. 629*

SUCHE NACH NEUEN JUPITERMONDEN

»Im Laufe der Zeit sind eine ganze Reihe von Jupitertrabanten entdeckt worden, aber allem Anschein nach gibt es mindestens noch einen weiteren Trabanten. Diese Feststellung des Radiophysikers Bigg gründet sich auf Eigentümlichkeiten der jovianischen Dekameterstrahlung. Seit 1955 weiß man, dass Jupiter im Radiowellenbereich eruptionsartige Emissionen aufweist. Beim Studium der Dekameteremission fand Bigg nun eine neue Periodizität der Eruptionshäufigkeit, die er glaubt, mit einem unentdeckten Jupitertrabanten in Verbindung bringen zu müssen.« *Die Umschau 20, S. 661*

Lesen Sie hier den ganzen Artikel:
www.menschenimfocus.de

Mit Weitblick voran.

Das Zukunftsbild des Toby Walsh im FOCUS.

WISSEN

Verführerischer Diener
Kindchenschema runder Kopf und große Augen: Ob Roboter so niedlich wie Pepper aussehen sollten, ist unter Experten umstritten

Pfleger, Unterhalter, Freund?
Humanoide „Companion Robots" (Roboter-Gefährten) wie Pepper sind bereits in Altenheimen und auf Kinderkrebsstationen im Einsatz

FOCUS 28/2019

TECHNIK

„In 40 Jahren ist künstliche Intelligenz klüger als der Mensch. Wir müssen ihr rechtzeitig Moral beibringen"

Der Informatiker und Computer-Philosoph **Toby Walsh** über unsere Zukunft im Zeitalter des Algorithmus

Hand in Hand
Walsh im Open Lab der Technischen Universität Berlin. Dort erforschen Wissenschaftler das Zusammenspiel von Mensch und Roboter

FOCUS 28/2019

Menschen im

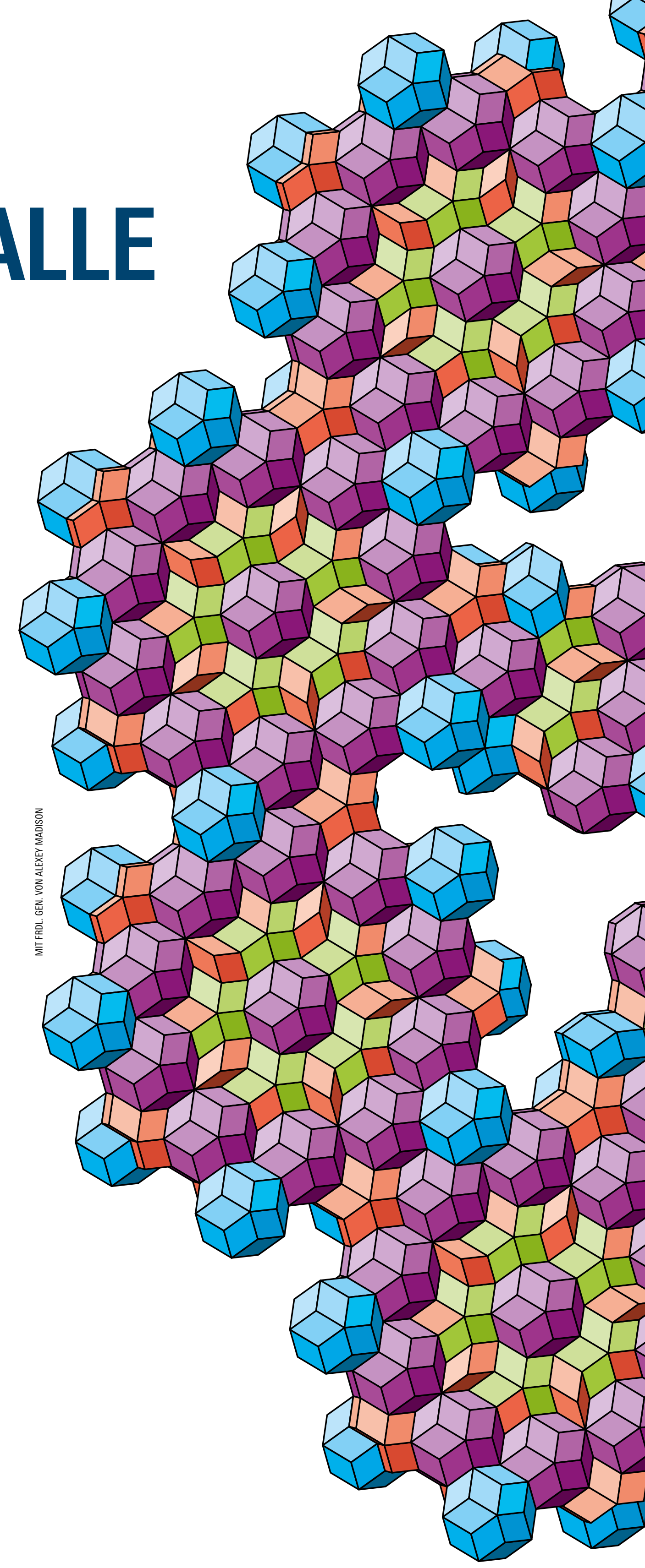


MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
NEUE MODELLE FÜR QUASIKRISTALLE

Konstruktionsverfahren für nichtperiodische Pflasterungen der Ebene lassen sich auf den Raum erweitern. Vor allem mit Hilfe des Substitutionsprinzips kann man dreidimensionale nichtperiodische Raumfüllungen erzeugen und damit ein Modell für jene seltsamen Festkörper liefern, welche Physiker als Quasikristalle bezeichnen.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

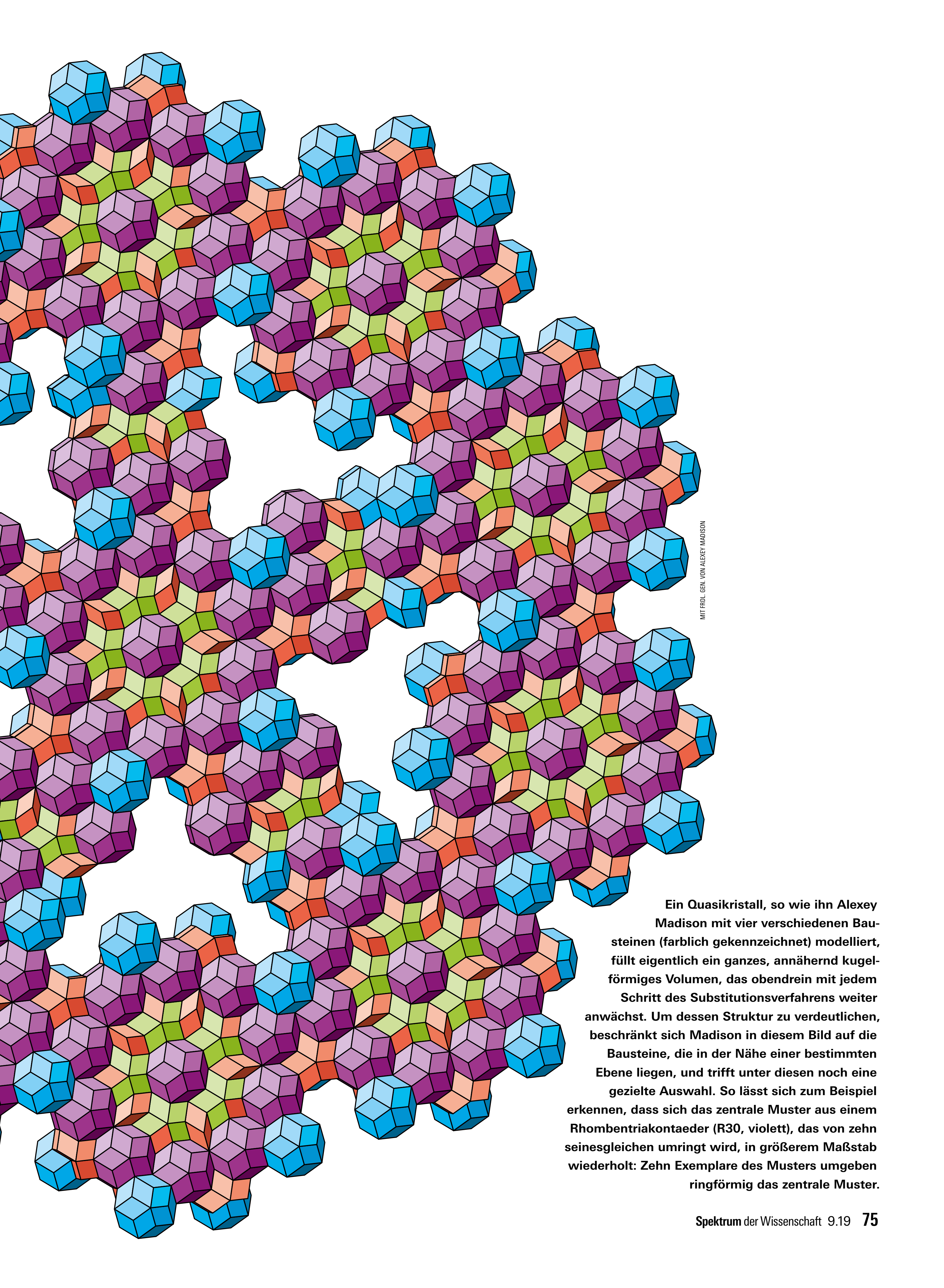
⏩ spektrum.de/artikel/1661450



MIT FRDL. GEN. VON ALEXEY MADISON

In der letzten Folge dieser Rubrik (siehe **Spektrum** Juli 2019, S. 80) ging es darum, wie Künstler die speziellen Eigenschaften der so genannten Penrose-Parkette für ihre Zwecke nutzen. Deren Urbausteine sind zwei »goldene Dreiecke«: gleichschenklige Dreiecke mit dem Seitenverhältnis des goldenen Schnitts ($\tau = \frac{\sqrt{5}+1}{2} \approx 1{,}618$), ein breites mit langer Basis und kurzen Schenkeln und ein hohes, bei dem die Schenkel τ-mal so lang sind wie die Basis. Zwei Exemplare eines goldenen Dreiecks, mit den Basen aneinandergelegt, ergeben eine dicke beziehungsweise eine dünne Raute, und dies sind die Pflastersteine, mit denen man ein im Prinzip unendliches Parkett legen kann. Allerdings nicht beliebig! Spezielle »Anlegeregeln«, anschaulich gemacht durch eine Musterung der Steine oder eine Deformation ihrer Kanten, erzwingen, dass das Parkett nichtperiodisch ist. Das heißt, anders als in der klassischen Badezimmerkachelung gibt es keine Parallelverschiebung, die das ganze Parkett mit sich selbst zur Deckung bringt. Vielmehr steckt in dem ganzen Muster eine fünfzählige Symmetrie – irgendwie.

Ein sehr mächtiges theoretisches Hilfsmittel zum Verständnis der nichtperiodischen Parkettierungen ist die so genannte Substitution. Man zerlegt jeden Stein in eine Menge verkleinerter Exemplare aus demselben Steinsortiment und vergrößert das so erhaltene Parkettfragment so,

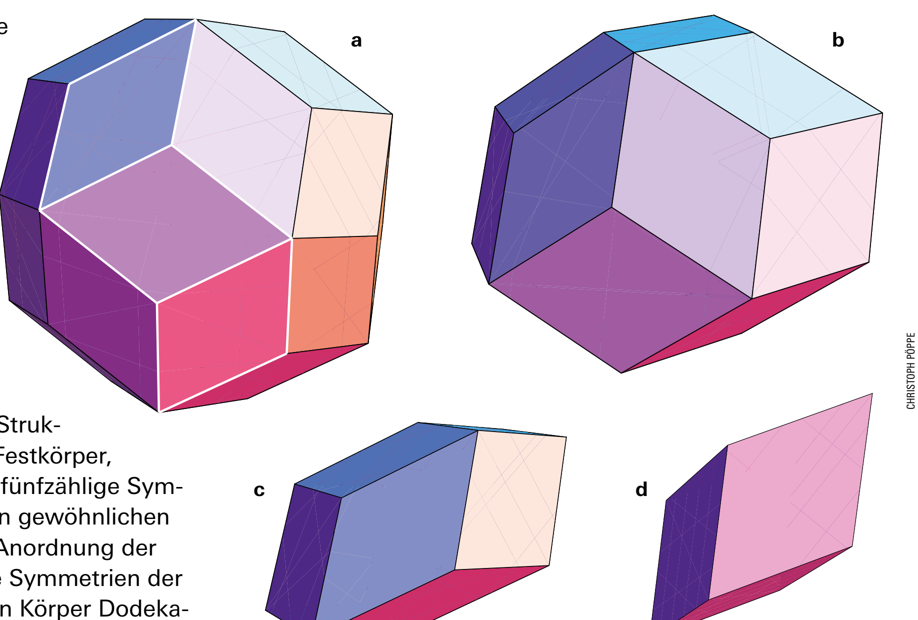


MIT FRDL. GEN. VON ALEXEY MADISON

Ein Quasikristall, so wie ihn Alexey Madison mit vier verschiedenen Bausteinen (farblich gekennzeichnet) modelliert, füllt eigentlich ein ganzes, annähernd kugelförmiges Volumen, das obendrein mit jedem Schritt des Substitutionsverfahrens weiter anwächst. Um dessen Struktur zu verdeutlichen, beschränkt sich Madison in diesem Bild auf die Bausteine, die in der Nähe einer bestimmten Ebene liegen, und trifft unter diesen noch eine gezielte Auswahl. So lässt sich zum Beispiel erkennen, dass sich das zentrale Muster aus einem Rhombentriakontaeder (R30, violett), das von zehn seinesgleichen umringt wird, in größerem Maßstab wiederholt: Zehn Exemplare des Musters umgeben ringförmig das zentrale Muster.

dass jeder Stein wieder die Originalgröße hat. Diese beiden Schritte kann man beliebig oft wiederholen mit dem Effekt, dass ein beliebig kleiner Teil eines Parketts – ein einziger Stein genügt – schrittweise zu immer größeren Flächen heranwächst und im Grenzwert die ganze unendliche Ebene bedeckt.

Vom Standpunkt der Festkörperphysiker aus ist die ganze schöne Theorie der Penrose-Parkette nur eine Vorübung für dasselbe in drei statt zwei Dimensionen. Ihnen geht es darum, die Struktur der Quasikristalle aufzuklären: jener Festkörper, die in der Röntgenstrukturananlyse eine fünfzählige Symmetrie offenbaren – was mit der für einen gewöhnlichen Kristall charakteristischen periodischen Anordnung der Atome unvereinbar ist. Vielmehr sind die Symmetrien der Quasikristalle diejenigen der platonischen Körper Dodekaeder und Ikosaeder.



Aus dem Rhombentriakontaeder (a) wird durch Herausschneiden eines Gürtels (bestehend aus den Rauten mit den weiß markierten Kanten) das Rhombenikosaeder (b); dasselbe Verfahren nochmals angewandt ergibt das (goldene) Rhombendodekaeder (c) und im letzten Schritt das dicke Rhomboeder (d).



Nichtperiodische Ordnung in drei Dimensionen

Also machte man sich auf die Suche nach einem Sortiment von Steinen, die in vielen Exemplaren aneinandergelegt den Raum lückenlos füllen, aber eben nicht periodisch wie die Atome in einem gewöhnlichen Kristallgitter, sondern zum Beispiel ikosaederartig. Eine periodische Anordnung sollte sogar unmöglich sein. Und allein der Übersichtlichkeit wegen wäre es hilfreich, wenn das Sortiment aus möglichst wenig verschiedenen Teilen bestünde.

Ein solches minimales Sortiment haben der Quasikristall-Pionier Paul Steinhardt und seine Kollegen Dov Levine und Joshua Socolar bereits vor reichlich 30 Jahren gefunden. Die beiden Steine haben eine oberflächliche Ähnlichkeit mit den beiden Rauten des Penrose-Parketts. Es handelt sich um ein dickes und ein dünnes Rhomboeder; das sind Körper, die von lauter gleichen Rauten begrenzt sind (siehe Bild unten). Diese wiederum sind »goldene Rauten«, das heißt solche, deren Diagonalen im Verhältnis des goldenen Schnitts stehen, im Gegensatz zu den Rauten des Penrose-Parketts, die zwar aus je zwei goldenen Dreiecken zusammengesetzt sind, allerdings ein anderes Diagonalenverhältnis haben.

Zehn dicke Rhomboeder (Vordergrund) und zehn dünne (Hintergrund) lassen sich zu einem Rhombentriakontaeder (R30) zusammensetzen.



Legt man drei goldene Rauten mit ihren spitzwinkligen Ecken um einen Punkt und setzt zwei Exemplare dieses Rautendreiers zu einem geschlossenen Körper zusammen, so erhält man das dicke Rhomboeder. Alternativ kann man in Gedanken einen Würfel mit starren, aber gegeneinander beweglichen Kanten deformieren, indem man zwei einander gegenüberliegende Ecken auseinanderzieht, bis alle Flächen die Form einer goldenen Raute angenommen haben. Das dünne Rhomboeder entsteht auf analoge Weise, indem man drei goldene Rauten mit ihren stumpfen Winkeln aneinanderlegt oder die Ecken des gedachten Würfels nicht auseinanderzieht, sondern aufeinander zudrückt.

Aus dicken und dünnen Rhomboedern lässt sich ein dreidimensionaler Quasikristall bauen. Das ist sogar einleuchtend, wenn man, wie die Mathematiker das gerne tun, die »abgehobene« Perspektive eines sechsdimensionalen Raums einnimmt. Schon die klassischen dicken und dünnen Rauten des Penrose-Parketts kann man als die perspektivisch verzerrten Bilder von Quadraten im fünfdimensionalen Raum auffassen (siehe **Spektrum** Februar 2002, S. 64). Dort gehören die Quadrate zu einem regelmäßigen Würfelgitter; dessen periodische Ordnung wird nur dadurch zerstört, dass man es in einer besonders schrägen Richtung in die zweidimensionale Ebene projiziert.

Ganz entsprechend sind das dicke und das dünne Rhomboeder Projektionen gewöhnlicher dreidimensionaler Würfel aus einem periodischen Gitter verallgemeinerter Würfel im sechsdimensionalen Raum (siehe **Spektrum** Dezember 2010, S. 66). Und wie im zweidimensionalen Fall stellt sich die Frage: Geht es bodenständiger? Lassen sich die für ebene Parkette erprobten Mittel, nämlich Anlegeregeln und Substitutionen, auch im Raum nutzen?

Die Antwort lautet: Im Prinzip ja, doch die Details sind schwierig. Man findet Anlegeregeln; nur geht dabei die schöne Einfachheit des Sortiments verloren. Aus den zwei Steinen werden 22, die zwar in ihrer Gestalt nach wie vor dem dicken oder dem dünnen Rhomboeder gleichen, aber auf ihrer Oberfläche verschiedene Markierungen tragen, die nur sehr spezielle Passungen zulassen. Schon 1986 haben daher Steinhardt und seine Kollegen das zweiteilige Sortiment durch ein vierteiliges ersetzt, mit dem besser umzugehen ist (siehe Bild links oben).

Der größte Stein des neuen Sortiments ist ein prominenter Vertreter jener Familie geometrischer Körper, die sich durch die Symmetrie der platonischen Körper Dodekaeder und Ikosaeder auszeichnen. Er heißt Rhombentriakontaeder, was nichts weiter ausdrückt als die Tatsache, dass er von 30 (goldenen) Rauten begrenzt wird. Da der Name so sperrig ist, soll der Körper im Folgenden R30 heißen. Man kann ein Dodekaeder und ein Ikosaeder so ineinandersetzen, dass jede Kante von einem der Körper eine Kante des anderen rechtwinklig und genau in der Mitte schneidet. Diese Kantenpaare bilden die Diagonalen der 30 Rauten, aus denen das R30 besteht. Obendrein ist das R30 die Projektion eines sechsdimensionalen verallgemeinerten Würfels in den dreidimensionalen Raum.

Gürtel herausschneiden

Zu allem Überfluss ist das R30 auch noch ein Zonoeder (»Gürtelkörper«). Das heißt, zehn seiner Rauten bilden einen Gürtel rings um den ganzen Körper: Dazu wählt man zwei benachbarte Rauten des R30 und fügt beiderseits Rauten an derart, dass die gemeinsamen Kanten zweier benachbarter Seitenflächen stets parallel sind (siehe Bild links oben a). Einen solchen Gürtel kann man herausschneiden und die beiden verbleibenden Reststücke zusammenschieben. Dadurch entsteht ein Körper aus 20 goldenen Rauten, das Rhombenikosaeder oder kurz R20.

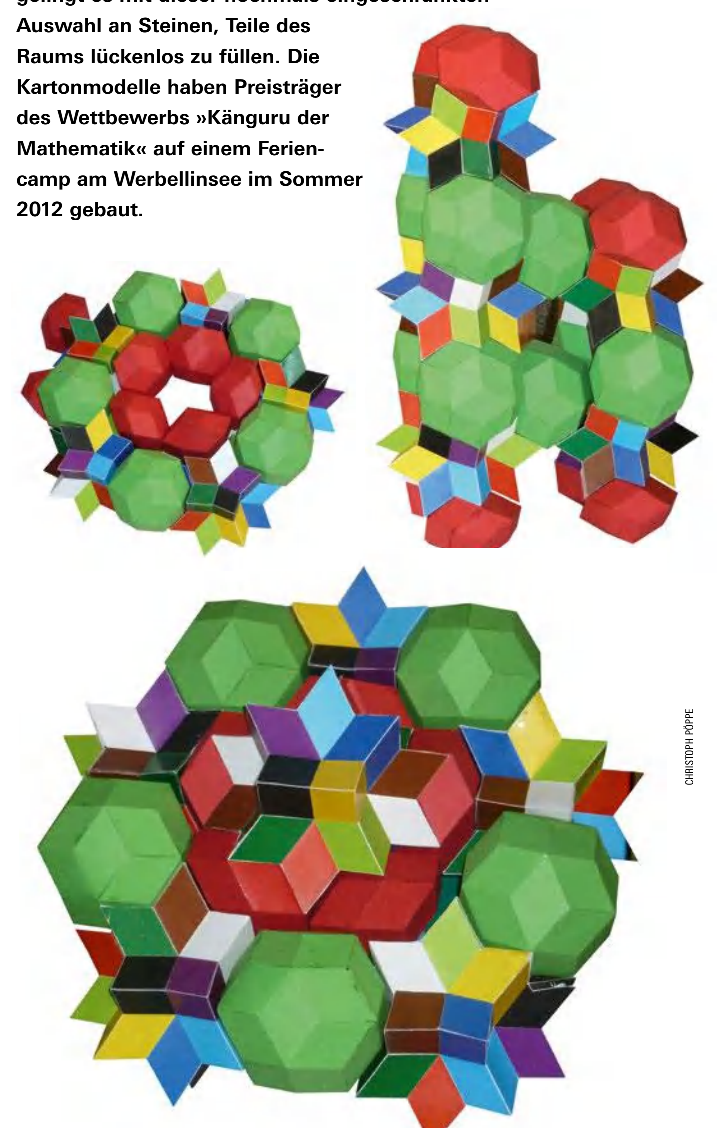
Das Verfahren »schneide einen Gürtel heraus und schiebe die Reste zusammen« kann noch zweimal wiederholt werden. Dadurch entstehen nacheinander ein Rauten-Zwölfflächner (Rhombendodekaeder, R12) und das dicke Rhomboeder, das nach dieser Systematik R6 heißt.

Die Einzelteile eines Quasikristalls aus dicken und dünnen Rhomboedern lassen isch so zu R30, R20 und R12 zusammenfassen, dass alle dünnen Rhomboeder vollständig in den großen Steinen aufgehen und nur noch einzelne dicke übrig bleiben. Damit braucht man das dünne Rhomboeder nicht mehr.

Für das Vier-Steine-Sortiment haben bereits Socolar und Steinhardt Anlegeregeln veröffentlicht. Wie im zweidimensionalen Fall geht dabei die Symmetrie der Steine zum Teil verloren. So sind die beiden spitzwinkligen Ecken des dicken Rhomboeders zwar geometrisch nicht voneinander zu unterscheiden, in ihren Anlegeregeln aber sehr wohl. Das muss so sein; denn sonst könnten sich diese Steine ja periodisch, in drei Raumrichtungen parallelverschoben, aneinanderlagern, und man hätte keinen Quasi-, sondern einen ganz gewöhnlichen Kristall. Allerdings dürfen sich 20 dicke Rhomboeder zu einem 20-spitzigen Stern zusammenlagern. In dessen Mittelpunkt treffen sich 20 spitzwinklige Rhomboederecken, die dann alle von der einen oder alle von der anderen Sorte sein müssen. Nennen wir ihn R60, weil er von 60 goldenen Rauten begrenzt wird.

Das Zusammensetzen dieser Steine ist ein sehr interessantes Spiel – eine Art Lego für Erwachsene, allerdings viel komplizierter. Es ist erstaunlich, welch merkwürdige, mehr oder weniger fünfzählig-symmetrische Gebilde dabei entstehen (siehe Bild unten).

Aus R30 (grün), R20 (rot) sowie R60 (bunt) lassen sich die seltsamsten Gebilde bauen. Irgendwie gelingt es mit dieser nochmals eingeschränkten Auswahl an Steinen, Teile des Raums lückenlos zu füllen. Die Kartonmodelle haben Preisträger des Wettbewerbs »Känguru der Mathematik« auf einem Feriencamp am Werbellinsee im Sommer 2012 gebaut.



CHRISTOPH PÖPPE

Quasikristall-Baukasten

1 Links zu sehen sind die vier Ursteine nach Socolar und Steinhardt. In der Mitte deren Kantenmodelle samt Anlegeregeln: Schwarzer Eckpunkt darf nur an schwarzen und weißer nur an weißen gelegt werden, und man darf keine pfeiltragenden Kanten an pfeillose setzen. Rechts die Substitution jedes Ursteins durch Steine mit einer um den Faktor τ^3 kleineren Kantenlänge.

R6

R12

R20

R30

MADISON, A.: SYMMETRY OF ICOSAHEDRAL QUASICRYSTALS. JOURNAL OF STRUCTURAL CHEMISTRY 26, 2015, FIG. 6; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON SPRINGER NATURE / CCC

Mit dem Substitutionsprinzip sind Steinhardt und seine Kollegen vor rund 30 Jahren allerdings nicht recht zu Rande gekommen. Diese Rhomboeder lassen sich nicht auf so einleuchtende Weise in kleine Exemplare ihrer selbst zerlegen wie die goldenen Dreiecke oder die aus ihnen zusammengesetzten dicken und dünnen Rauten. Aber hier gibt es neuerdings Fortschritte.

Ruth Maria Katharina Dietl hat in ihrer Doktorarbeit an der Universität Augsburg tatsächlich eine Zerlegung des dicken und des dünnen Rhomboeders in kleinere Exemplare gefunden. Allerdings in ziemlich viele: Aus einem dicken Rhomboeder werden 55 kleine dicke und 34 kleine dünne, aus einem dünnen 34 dicke und 21 dünne. Man erkennt Zahlen aus der Fibonacci-Folge wieder – jedes Glied ist gleich der Summe seiner beiden Vorgänger –, die ihrerseits eine enge Beziehung zur Zahl τ des goldenen Schnitts hat: Der Quotient aus einem Folgenglied f_n und seinem Vorgänger f_{n-1} strebt für n gegen unendlich gegen den Wert τ.

Wie kommen diese großen Zahlen zu Stande? Eigentlich hätte man vermutet, dass die Kantenlängen der kleinen Steine (der »Kinder«) sich zu denen der großen (der »Eltern«) wie eins zur Zahl τ verhalten. So ist es jedenfalls in zwei Dimensionen. Aber allem Anschein nach kann man aus τ-fach verkleinerten Steinen keine in Originalgröße zusammensetzen. Das gelingt erst, wenn man sie dreimal hintereinander τ-fach verkleinert. Dann aber ist die Kante eines großen Steins τ^3-mal so lang wie die eines kleinen, und er hat dabei das τ^9-fache Volumen. Da $\tau^9 \approx 76{,}0132$ ist, hat das mit den großen Anzahlen schon seine Richtigkeit.

Alexey Madison von der Polytechnischen Peter-der-Große-Universität Sankt Petersburg (Russland) hat dasselbe Problem auf Basis des Vierersortiments von Socolar und Steinhardt gelöst. Auch er arbeitet mit einem Verkleinerungsfaktor von τ^3 und hat deswegen mit ähnlich vielen Kleinteilen zu kämpfen wie Ruth Dietl. Nur dadurch, dass sie diesmal zu vier verschiedenen Sorten gehören, wird die Sache etwas übersichtlicher (siehe »Quasikristall-Baukasten«, oben 1).

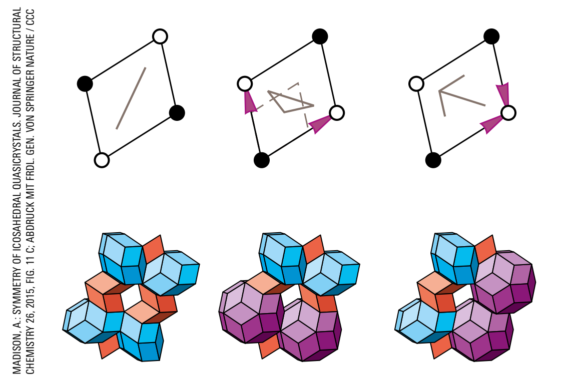
Auf den ersten Blick irritieren diese Bilder. Nur unter großem Aufwand an gutem Willen und mit Hilfe der Linien erkennt man in dem Gebilde rechts oben im obigen Bild mit den vielen Auswüchsen so etwas Ähnliches wie das Rhomboeder, das es angeblich sein soll. Aber es geht alles mit rechten Dingen zu. Die Elternsteine haben zwar mit glatten Flächen aneinandergelegen; das bedeutet aber nicht, dass ihre Kinder das auch tun müssen. Es genügt, wenn sie zusammenpassen.

Symmetrien zerstören

Schon Socolar und Steinhardt hatten für ihre Steine drei verschiedene Typen von Rautenflächen ausgemacht. Damit hatten sie insbesondere zahlreiche Symmetrien zerstört, mit denen die Steine, rein geometrisch gesehen, ausgestattet waren, und so jede periodische Anordnung der Steine vereitelt. Ihre Anlegeregeln laufen darauf hinaus, dass stets nur Flächen gleichen Typs aneinandergelegt werden dürfen. Madison greift diese Typeneinteilung auf und findet für jeden Typ eine Besetzung mit kleinen Steinen (siehe »Quasikristall-Baukasten«, S. 79, oben 2). Wo zwei Elternsteine aneinander grenzen, sitzen deren Kinder an der Grenzfläche jeweils am selben Platz. Eins von beiden muss weichen – kein Problem in der Computermodellierung.

2 In dem Quasikristall-Modell von Socolar und Steinhardt gibt es drei Typen von Rautenflächen: von links nach rechts pfeillose, mit auseinanderstrebenden und mit zusammenstrebenden Pfeilen (Pfeile führen stets von schwarzen zu weißen Ecken). Die Rauten haben in ihrem Inneren die von Socolar und Steinhardt eingeführten Kennzeichnungen. Madison setzt auf jede Fläche ein Ensemble von Steinen (unten). Die substituierten Versionen der Steine tragen diese Ensembles auf ihrer Oberfläche; wo zwei große Steine aneinandergrenzen, haben ihre Abkömmlinge genau diese Ensembles gemeinsam.

3 Der Aufbau des substituierten R30 hält sich an die Symmetrien dieses Körpers, die wiederum identisch mit den Symmetrien von Ikosaeder und Dodekaeder sind: Es gibt 30 zweizählige Symmetrieachsen, 20 dreizählige und zwölf fünfzählige. Mit einem R30 im Zentrum (a) setzt man 30 R12 auf die zweizähligen Achsen (b), dann 20 Rhomboeder (R6) auf die dreizähligen Achsen (c), zwölf Gruppen zu je zehn R6 auf die fünfzähligen (d), 20 R30 auf die dreizähligen (e), zwölf R20 auf die fünfzähligen (f) und 20 Zehnergruppen von R6 auf die dreizähligen (g). Dann bedeckt man die zwölf R20 aus Schritt (f) mit Fünfergruppen von R6 (h) und füllt die verbleibenden Lücken mit zwölf Ringen aus je 5 R20 (i).



MADISON, A.: SYMMETRY OF ICOSAHEDRAL QUASICRYSTALS. JOURNAL OF STRUCTURAL CHEMISTRY 26, 2015, FIG. 11 C; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON SPRINGER NATURE / CCC

MADISON, A.: SYMMETRY OF ICOSAHEDRAL QUASICRYSTALS. JOURNAL OF STRUCTURAL CHEMISTRY 26, 2015, FIG. 7; ABDRUCK MIT FRDL. GEN. VON SPRINGER NATURE / CCC

Alle Kinder eines Steins an den richtigen Platz zu setzen, erfordert große Sorgfalt. So sind für die Kinderschar des R30 acht Schichten verschiedener Steine um ein kleines R30 im Zentrum zu legen (siehe »Quasikristall-Baukasten«, oben 3). Damit ist die Entwurfsarbeit erledigt. Die Zusammensetzung der übrigen Kinderscharen lässt sich aus der des größten, des R30, herleiten.

Wie bei Substitutionen üblich, lassen sich aus beliebig kleinen Anfängen Kinder, Kindeskinder und weitere Generationen erzeugen, die mit rasantem Tempo immer größere Teile des Raums ausfüllen. Hat der Anfang die Symmetrie des Ikosaeders, so vererbt sich diese bis ins Unendliche. Dafür gibt es genau drei Möglichkeiten: das R30 und die beiden Varianten des R60, zusammenzusetzen aus 20 dicken Rhomboedern. Auf diesem Weg kann Madison im Computer beliebig große Quasikristalle erzeugen, sie sogar entlang gewisser Ebenen zerbrechen und die Bruchflächen zeigen (siehe Bild, S. 74/75).

Ist dies die einzige Möglichkeit, fünfzählige Quasikristalle oder, mathematisch präziser ausgedrückt, Raumfüllungen mit der Symmetrie des Ikosaeders zu erzeugen? Ist die Konstruktion von Alexey Madison dieselbe wie die von Ruth Dietl, nur in anderer Darstellung? Wahrscheinlich nicht. In Dietls Konstruktion bleibt Platz für eine gewisse, lokal begrenzte Willkür; und möglicherweise gibt es verschiedene Möglichkeiten, Ensembles aus dicken und dünnen Rhomboedern zu den großen Socolar-Steinhardt-Steinen zusammenzufassen. Immerhin entsteht in beiden Konstruktionen an jeder Ecke, an der mehrere Elternsteine aufeinandertreffen, bei den Kindern ein R60.

Die Physiker haben damit ein weiter ausgearbeitetes Modell für einen Quasikristall an der Hand. Ihnen bleibt die interessante Aufgabe, die Steine zu »dekorieren«, das heißt zu bestimmen, wo in jedem Stein die Atome sitzen. Und das ist alles andere als einfach. ◂

QUELLEN

Dietl, R.M.K, Eschenburg, J.-H.: Three-dimensional Penrose tilings and self-similarity. Preprint, Universität Augsburg, 2012

Madison, A.E.: Substitution rules for icosahedral quasicrystals. Royal Society of Chemistry Advances 5, 2015

Madison, A.E.: Atomic structure of icosahedral quasicrystals: stacking multiple quasi-unit cells. Royal Society of Chemistry Advances 5, 2015

Socolar, J.E.S., Steinhardt, P.J.: Quasicrystals. II. Unit-cell configurations. Physical Review B 34, 1986



MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ

JAVA
DIE HERREN DER GOLDRINGE

Mit den hinduistisch-buddhistischen Königreichen entwickelte sich auf Java eine höfische Kultur, in der Goldschmuck eine zentrale Rolle spielte. Moderne Materialanalysen in Kombination mit kulturhistorischen Untersuchungen verraten Archäologen viel über seine gesellschaftliche Bedeutung.

SERIE

Gold und Macht

Teil 1: August 2019
Krieger mit Goldschmuck
Barbara Armbruster und Roland Schwab

Teil 2: September 2019
Die Herren der Goldringe
Mai Lin Tjoa-Bonatz

Teil 3: Oktober 2019
Die Schätze der Wikinger
Heidemarie Eilbracht und Antje Wendt

Die Vornehmen präsentieren Goldschmuck, während Goldmünzen und -ringe vom Himmel fallen. Das Relief vom Borobudur-Tempel unterstreicht die Wichtigkeit des Edelmetalls auf Java im 9. Jahrhundert.

MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ



Die Kunsthistorikerin und Archäologin **Mai Lin Tjoa-Bonatz** ist Expertin für die Kulturgeschichte Südostasiens. Seit 2001 forscht sie vorrangig zu Indonesien und hat unter anderem die Goldsammlung des Weltkulturen Museums Frankfurt untersucht.

⏩ spektrum.de/artikel/1661452

Als Prinz Vessantara aus dem Exil in seine Hauptstadt zurückkehrte, schickten die Götter roten Regen als Ausdruck für ihren Segen und als Versprechen auf Reichtum. Diese Legende verarbeitete ein Bildhauer im 9. Jahrhundert auf Java in einem Relief des Tempels Borobudur (siehe Bild), des größten buddhistischen Sakralbaus überhaupt. Im Zentrum der Insel waren zu dieser Zeit Fürstentümer zu Königreichen herangewachsen, in denen Gold eine zentrale Rolle spielte: In Form von Schmuck kennzeichnete es den Adel, als Material für religiöse Bauten und Kunstwerke das Himmlische, als Münzmetall Reichtum

AUF EINEN BLICK
IMPORTIERTES GOLD, INTEGRIERTE IDEEN

1 Goldschmuck war ein unverzichtbarer Bestandteil der Hofkultur in der klassischen Zeit Javas (um 700–1527). Das Edelmetall musste auf dem Seeweg importiert werden.

2 Um Schmucktypen zu unterscheiden, untersuchten Forscher Artefakte kunsthistorisch, ermittelten die verwendeten Legierungen spektroskopisch und datierten Stücke, zum Beispiel mit der Radiokarbonmethode.

3 Dabei erstaunen immer wieder das handwerkliche Geschick und die Kreativität der javanischen Goldschmiede. So nutzten sie heilige Symbole Indiens und erweiterten damit das Repertoire ihrer eigenen Kultur.

Ein Wickelring aus Golddraht mit aufgelöteten Goldkügelchen und gefasstem Stein zeigt die hohe Kunst der Goldschmiede Javas.

MUSEUM WELTKULTUREN FRANKFURT AM MAIN (INV. NR. 19682); CEZA; MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ

und Wirtschaftsmacht. Dementsprechend ließ es der unbekannte Gestalter auf dem Relief in Form von Geldstücken und Ringen herabregnen.

Java gehört zu Indonesien, das mehr als 17000 Inseln in Südostasien umfasst. Auf die Frühgeschichte Anfang des 1. Jahrtausends folgte eine klassische Periode, in der Hinduismus und Buddhismus dominierten, unterteilt in eine frühe, mittlere und späte Periode (700–929, 929–1200 und 1200–1527). Dabei lag das Zentrum der Herrschaft lange in Zentraljava und verlagerte sich im 10. Jahrhundert nach Ostjava. Nach dem Untergang des letzten großen Königreichs Majapahit endete das hinduistisch-buddhistische Zeitalter und die islamische Phase begann.

Gold war ein zentrales Element der Hofkultur in klassischer Zeit, wie Artefakte, bildliche Darstellungen und altjavanische Texte zeigen. Vermutlich steigerte seine Beständigkeit gegenüber den andere Materialien zersetzenden Umweltbedingungen seine Wertschätzung. Neben Ringen, die auch als Zahlungsmittel galten, fertigten Kunstschmiede diversen Kopfschmuck, Ketten und Gürtel für den Oberkörper, Ringe für Finger und Arme. Solcher Zierrat wurde zudem bei archäologischen Grabungen gefunden, meist aufbewahrt in einer kupfernen Schatzkiste oder in Keramiktöpfen.

Die Kostbarkeiten einer bestimmten Phase Javas zuzuordnen, gelang bislang aber nur anhand von Stilvergleichen mit bereits datierten Objekten. Das mochten gleichartige Schmuckstücke sein, die bei archäologischen Grabungen zu Tage kamen oder bis in die Kolonialzeit als Erbstücke aufbewahrt wurden. Ähnliche Stilmerkmale finden sich auch auf Reliefs und Statuen, die anhand anderer Kriterien datierbar waren. Viele Artefakte jedoch ließen sich auf diese Weise allein nicht in die Chronologie der Insel einbetten. Insgesamt wissen wir deshalb noch zu wenig über Typologie, Stilgeschichte oder den Gebrauch insbesondere des Goldschmucks. Zudem stoßen Kunsthistoriker an methodische Grenzen, wenn ein Objekt auftaucht, das keine Parallelen zu bekannten aufweist. Ein Problem sind im Übrigen solche ungesicherter Herkunft, wie man sie seit den 1980er Jahren immer wieder auf dem internationalen Antikenmarkt findet. Handelt es sich im Einzelfall um eine Fälschung? Oder ist das Artefakt zwar echt, stammt aber aus Raubgrabungen oder wurde aus einer Ausgrabung gestohlen? Erst kürzlich entdeckte der auf Sulawesi lebende deutsche Archäologe Horst Liebner anhand der Funddokumentation, dass mindestens 20 Prozent eines goldenen Unterwasserschatzes in der Java-See während oder nach der Bergung verschwanden.

Gesucht sind daher Verfahren, um Goldartefakte zu datieren und zu charakterisieren. Inzwischen liegen archäometrische und stilgeschichtliche Studien für altjavanische Finger- und Ohrringe vor, die zum Bestand des Frankfurter Weltkulturen Museums gehören, sowie für hunderte Goldobjekte aus Privatsammlungen der Golden Lotus Foundation Singapore. Die Analysen der Materialzusammensetzung erfolgten am Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH (CEZA) in Mannheim mittels Röntgenfluorenzanalyse und Massenspektrometrie sowie an der Goethe-Universität Frankfurt mit weiteren spektroskopischen Methoden. Die zeitliche Einordnung geschah insbesondere durch ^{14}C-Datierung winziger Kohlenstoffreste, die aus den Belägen einiger Artefakte gewonnen wurden, und anhand stilistischer, das heißt kunsthistorischer Vergleiche.

Gewinnen, reinigen, anreichern

Trotz der Allgegenwart von Gold im klassischen Java gab es auf der Insel selbst nur geringe Vorkommen; es musste also importiert werden. Auch heutzutage gewinnt man es auf Sumatra, Borneo, Sulawesi und Mindanao, sei es als Flussgold, mit einer Schale oder Wanne aus dem Schlamm gewaschen, oder als Berggold in Minen oder Tagebauwerken der von Regenwald bedeckten Hochebenen. Mit Quecksilber wird es von anderen Mineralen getrennt, worauf man noch den Silberanteil verringerte, etwa durch Erhitzen mit Eisensulfat, Salz und Ziegelmehl.

Vor Jahrhunderten dürften die Metallhandwerker diesen Prozess ebenfalls vollzogen haben, es gibt dazu jedoch nur wenige archäologische Belege. Aus einem Schiff, das im 10. Jahrhundert vor Sumatra sank, wurden Goldschmiedewerkzeuge wie Reibsteine, tönerne Schmelztiegel und Ausgussformen geborgen. Ähnliches kam an Orten des Berggoldabbaus auf Sumatra aus dem 12. bis 14. Jahrhundert zum Vorschein – offenbar hat man das Edelmetall durchaus direkt an den Lagerstätten verarbeitet. Das Fragment eines Tontiegels, wie er heutzutage noch zum Aufschmelzen von Gold verwendet wird, entdeckten deutsche Archäologen vor wenigen Jahren in Westsumatra.

Als »Glücksring« war dieses Schmuckstück wohl in Tempelritualen Zentraljavas gestiftet worden. Das Sri-Schriftzeichen symbolisierte Fruchtbarkeit.



MUSEUM WELTKULTUREN FRANKFURT AM MAIN (INV. NR. 19715); MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ

Neben- und Spurenelemente im Gold, die sich mittels Röntgenanalytik nachweisen lassen, könnten helfen, den Ursprung des Edelmetalls zu ermitteln. Hier steht die Forschung noch am Anfang, wobei bereits neu entsprechende Daten an einigen Artefakten aus Java erhoben wurden. Es kommt erschwerend hinzu, dass Kupfer ein natürliches Begleitelement von Gold ist, mitunter aber der Schmelze zugegeben wurde. Die Legierung erhält einen roten Farbton und ist härter als Naturgold. Elemente der so genannten Platingruppe sind in Mineralen Gold führender Flüsse enthalten und geraten daher mit in die Schmelze. Insbesondere das Mengenverhältnis des namengebenden Platins zu dem verwandten Element Palladium scheint für die geologische Umgebung der Gewässer charakteristisch zu sein. Demnach entspricht der Rohstoff einiger javanischer Schmuckstücke den auf Bali gefundenen Grabbeigaben der Zeit 200 v. Chr. bis 500 n. Chr. Für die Analyse mit Massenspektrometern muss allerdings eine Probe entnommen und verdampft werden. Das Verfahren wird daher nur selten eingesetzt.

In klassischer Zeit importierte Java nicht nur Gold, sondern trieb mit Produkten daraus seinerseits Seehandel bis nach Ost-, Süd- und Westasien. Schiffe des 10. bis 18. Jahrhunderts, deren Wracks in indonesischen Gewässern gehoben wurden, hatten einst Schmuck und Gefäße aus Gold transportiert, dazu Altgold und Barren von zuvor noch nicht verarbeitetem Edelmetall. So beförderte die »Cirebon« im 10. Jahrhundert mehr als 500 Goldobjekte, dazu hunderte Kilogramm Halbedelsteine wie Quarz und Lapislazuli, um sie in Schmuckstücke einzusetzen. Verschifft wurde, was sich verkaufen ließ: Chinesisches Gold- und Silbergeschirr gelangte deshalb in die südostasiatische Inselwelt, dort gefertigter Goldschmuck fand sich in China.

Java importierte auch Schmucksteine mit eingravierten Namen. Solche in arabischer Kalligrafie, Kufi genannt, stammen aus dem Iran des 8. bis 11. Jahrhunderts, allerdings wurden erst zwei Exemplare beschrieben. Diese hat man offenbar als Vorprodukte erworben und auf Java in Ringe eingesetzt, wie die Untersuchungen des Metalls nahelegen. So war die Legierung mit hohem Goldgehalt für gegossene Ringe der frühen Klassik durchaus gebräuchlich. Auch die Verarbeitung entspricht javanischer Tradition: Die Ringschiene wurde zunächst aus einem Goldblech gefaltet und in die konzentrische Form gehämmert. Der den Stein aufnehmende Kopf ist nur leicht erhaben, dünne Krallen halten den Stein in der Fassung.

Ob solche Schmuckstücke als Siegelringe verwendet wurden, wobei die Kalligrafie den Namen des Ringträgers bezeichnete, oder ob sie wie Amulette Unheil abwehren sollten, lässt sich leider heutzutage nicht mehr ermitteln. Die Gemmen wurden noch Jahrhunderte später in neue, dem gewandelten Zeitgeschmack angepasste Fassungen eingefügt, waren demnach also als geschätzte Antiquitäten weitergegeben worden.

Auf javanesischen Ringen finden sich zudem in Indien gebräuchliche religiöse Symbole wie das vasenähnliche Zeichen der hinduistischen Fruchtbarkeitsgöttin Sri oder das liegende heilige Rind – direkt in Gold gegossen. Vielleicht gab es keine entsprechend gravierten und für den Import geeigneten Steine, deshalb schufen die Kunstschmiede der Insel ihre eigene Variante. Das Sri-Zeichen kombinierten sie dabei mit einem Ring, der die Form eines Büffelhorns imitierte (siehe Bild links unten). Denn der für den Reisanbau unabdingbare Wasserbüffel symbolisierte in



Im Wesentlichen besteht das als Ohrring gestaltete mythische Tier aus Silber, doch an der Oberfläche hat man Gold angereichert.

MUSEUM WELTKULTUREN FRANKFURT AM MAIN (INV. NR. 19664); MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ





RING: MUSEUM WELTKULTUREN FRANKFURT AM MAIN (INV. NR. 19722); MÜNZE: OKKY OKTA WIJAYA; BEIDE MIT FRDL. GEN. VON MAI LIN TJOA-BONATZ

Die in Palembang auf Sumatra gefundene indische Chola-Münze des 10. oder 11. Jahrhunderts (rechts) zeigt ein ähnliches Fisch-über-Lotus-Motiv wie ein Goldring aus Zentraljava aus dem 9. bis 10. Jahrhundert.

dieser Region Südostasiens ebenfalls Fruchtbarkeit. Somit entstand eine neue Gattung Goldringe als identitätsstiftende Schmuckform Javas.

Die Kreativität und technische Raffinesse der Goldhandwerker des klassischen Java ging mit einem hohen gesellschaftlichen Ansehen einher. Ein Mythos erzählt sogar, der 1222 gekrönte König Ken Angrok des ostjavanischen Reichs Singhosari habe das Edelmetall selbst hergestellt. Das Goldgewerbe war bereits im 9. Jahrhundert so weit ausdifferenziert, dass es Spezialisten für die Anfertigung von Schmuck gab, während andere Gefäße, Goldfäden für Textilien, vergoldete Möbel, Pavillons oder Waffen produzierten. Zudem standen ihnen diverse Techniken zur Verfügung, um das jeweils optimale Ergebnis zu erzielen. Ihre Waren boten diese Experten auf regelmäßig abgehaltenen Märkten an. Vermutlich gaben sie ihre Fertigkeiten ausschließlich an die Söhne weiter – die Goldschmiedekunst war ein gut gehütetes Geheimnis.

JAVA GOLD
Pracht und Schönheit Indonesiens

STUDIO MANGO, FOTO: MAURO MAGLIANI

AUSSTELLUNGSHINWEIS

Javagold

Pracht und Schönheit Indonesiens

15. 9. 2019 – 13. 4. 2020

Reiss-Engelhorn-Museen Mannheim

Die im Artikel beschriebenen Schmucktypen sind Teil der Ausstellung.

Die dem Edelmetall zugeschriebenen Qualitäten gingen weit über seinen Materialwert hinaus. Es symbolisierte göttliche Kraft, Tugend und Schönheit. Der Reichtum eines Herrschers manifestierte sich für jedermann sichtbar in golddurchwirkten Stoffen, vergoldeten Dolchen, Thronsesseln und Booten. Im Palast wurden Dächer und Wände vergoldet, Stufen erhielten Gold- und Silbereinlagen; sogar Hunde wurden damit geschmückt. Selbst die vier Methoden, Gold auf seine Echtheit zu prüfen – mit Hilfe eines Reibsteins, durch Hämmern, Aufschneiden oder Aufschmelzen – verglich man mit menschlichen Eigenschaften wie Belesenheit, Charakter, Tugend und Wohltätigkeit. Seine Verwandlung beim Schmieden machte nach altjavanischem Verständnis das Wirken höherer Mächte sichtbar. Deshalb beschrieb ein Text des 9. Jahrhunderts den idealen König: »Er solle ewig respektiert werden und den Obersten in der Welt verkörpern. Ihm solle man folgen wie Perlen an einer Kette. Ein Mann von gutem Benehmen ist wie ein solides Ohrgehänge. Die Anbetung Schiwas verewigt sich in einem Kronjuwel.« (Zitat gekürzt)

Chemische Analysen von altjavanischem Schmuck verraten, dass Gold, Silber und Kupfer immer miteinander legiert wurden. Unter dem Mikroskop zeigen abgeriebene Ränder einen silbernen Schimmer. Viele kleine Objekte sowie künstlerisch anspruchsvolle Ohrgehänge enthalten bis zu 60 Prozent dieses Edelmetalls, wahrscheinlich wurde Gold aber auf der Oberfläche mit geeigneten Verfahren angereichert. Ob ästhetische Gründe ausschlaggebend waren oder ob man kostbareres Edelmetall sparen wollte, lässt sich nicht sagen (siehe Bild S. 83).

Mit nur 12 bis 17 Prozent Silber und einem Kupferanteil von 3 bis 5 Prozent formte man einen dank des hohen Goldgehalts weichen Draht, der vielleicht schon im 2., spätestens im 6. Jahrhundert kunstvoll gewickelt oder gedreht wurde. Es gab einfach umwickelte Ringe, aber im 13. oder frühen 16. Jahrhundert auch sehr aufwändig gearbeitete aus mehrfach geflochtenem Kordeldraht und aufgelöteten Goldkügelchen (siehe Bild S. 82, oben).

Mitunter hat man das Goldgewicht notiert, beispielsweise auf der Rückseite von Schmuckbändern aus fein gearbeitetem Goldblech, zusammen mit Namen und Titeln – die kostbarsten Stücke gehörten offenbar der königlichen Familie. Solche Bänder schmückten den nackten Oberkörper, dienten aber auch als Hüftgürtel, der eine rockartige Bekleidung hielt, wie sie heutzutage noch in Südostasien üblich ist. Sie wurden mit floralen Mustern und eingelegten Halbedelsteinen verziert. Letztere hat man mit Bronzeblechen hinterlegt, deren chemische Analyse die anhand der Motivik und Schrift ermittelte Datierung des Zierrats unterstützt: Solche Bänder gehörten zwischen 700 und 1200 zur Bekleidung der Königsfamilie.

Glücksringe in Tempelritualen

Angesichts einer derart zentralen Rolle in der javanischen Adelsgesellschaft wundert es nicht, dass Goldschmuck verschiedenen Zwecken diente. Im 13. Jahrhundert wurden Hofdamen, die anmutig tanzen, rezitieren und musizieren konnten, mit einem goldenen Ring, Armband oder einer Halskette belohnt. Als höchste Auszeichnung galt ein goldenes Gewand. Demnach zählte bei solchen Gunstbeweisen nicht nur das reine Goldgewicht, sondern auch die ästhetische und technische Leistung des verantwortlichen Kunsthandwerkers.

Tempellisten des 9. bis 11. Jahrhunderts, eingraviert in Stein oder Metall, berichten zudem, so genannte Versöhnungs- oder Glücksringe aus Gold seien zusammen mit Textilien, Geld, Metallwaren oder Waffen von Privatpersonen gestiftet worden, auf dass der Herrscher oder eine Behörde ihnen im Gegenzug Steuern oder Arbeiten für das Heiligtum erlasse. Solche Stücke kennt man von Reliefs und aus Sammlungen. Laut chemischen und kunsthistorischen Analysen stellten sie eine weitere Schmuckklasse dar. Kompakt aus Goldguss gefertigt, waren sie nach der aus Indien übernommenen Gewichtseinheit »masa«, die 2,4 Gramm entsprach, in vier Klassen gestaffelt: Die leichteste wog vier »masa«, die schwerste 16 »masa«, also immerhin um die 38 Gramm! Untersuchungen zur Legierung bestätigen, dass all diese Versöhnungsringe 80 bis 90 Prozent Feingold aufwiesen.

Auch eine besondere Motivwahl kennzeichnet diese Schmuckstücke: Schriftzeichen, das Symbol der Fruchtbarkeitsgöttin Sri, ein Fisch über einer Lotusblüte (siehe Bild links außen). Diese Darstellungen waren in die Gussform der Ringe eingearbeitet und – so verraten Mikroskopaufnahmen – mit feinem Ziselierwerkzeug nachgearbeitet worden. Diese Motive finden sich ebenso auf Gold- und Bronzemünzen des indischen Chola-Reichs (4. bis 13. Jahrhundert), die über den Seehandel im insularen Südostasien weit verbreitet wurden (siehe Bild linke Seite). Ein weiteres Beispiel dafür, dass sich javanische Goldschmiede von den Ausdrucksformen eines anderen Kulturkreises inspirieren ließen und sie in die eigene Vorstellungswelt übertrugen, um das künstlerische Repertoire Javas auf höchst qualitätvolle Weise zu erweitern. ◂

Spektrum LIVE
Veranstaltungen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

Die Spektrum-Schreibwerkstatt

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?
Dann profitieren Sie als Teilnehmer des **Spektrum**-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg
Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«;
Preis: € 139,– pro Person;
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,–

Infos und Anmeldung:
Spektrum.de/schreibwerkstatt

UNSPLASH / JOANNA KOSINSKA (https://unsplash.com/photos/1_CMoFsPfso)



AKINDO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

12. 11. 2019 Redaktionsbesuch **Sterne und Weltraum**, Heidelberg
13. 11. 2019 Leserexkursion zum Forschungszentrum Jülich

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

7. 9. & 5. 10. 2019 Laborkurs: CRISPR-Whisper-Experiment »Aus Blau mach Weiß«, Berlin
20.–22. 9. 2019 Symposium »Unbestimmt und relativ? Das Weltbild der modernen Physik«, Nürnberg
27. 9. 2019 **Spektrum** Schreibwerkstatt, Heidelberg
11.–13. 10. 2019 Symposium »Bessere Menschen? Technische und ethische Fragen in der transhumanistischen Zukunft«, Nürnberg
15.–16. 11. 2019 Stuttgarter Zukunftssymposium »Kollege KI – Arbeit 4.0«, Stuttgart
22. 11. 2019 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Pasta, Pomodori, Parmigiano: Physik pur«, Frankfurt am Main
27. 11. 2019 DHV-Symposium »Maschinen statt Menschen? Chancen und Grenzen künstlicher Intelligenz – aus Sicht der Wissenschaft«, Bonn
28. 11. 2019 **Spektrum** Schreibwerkstatt, Heidelberg
24. 1. 2020 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Offenbach

---

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im September: **Gehirn**&**Geist** Dossier 1/2019 »Schlafen und Träumen«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

---

Leserreisen

Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
travel-to-nature-Reisen nach **Namibia**, **Peru** oder **Costa Rica** zum Vorteilspreis
Einkaufsgutschein für den **Spektrum**-Shop bei Buchung der Chile-, Polarlicht- oder Mexikoreise von Wittmann Travel e.K.

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus



FRANZI SCHÄDEL (FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE/) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/4.0/LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT
VIEL LÄRM UM NICHTS!

Auch wenn sie zunächst als überflüssig galt, hat sich die Null inzwischen durchgesetzt – allerdings muss man sie sorgfältig definieren.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1661454

Man könnte meinen, nichts wäre einfacher als das Nichts: Nichts ist, wenn nichts da ist. Aber auf die Idee, dass man das auch mathematisch definieren kann, sind die Menschen erst erstaunlich spät gekommen. In moderner Formulierung sieht das Nichts so aus:

$$\exists M : \forall X : \neg(X \in M)$$

In den alten Hochkulturen von Babylonien, Griechenland und Rom gab es keine Null; zumindest nicht als eigenständige Zahl. Sie wurde erst nötig, als das Stellenwertsystem vor etwa 2000 Jahren in Indien entstand. Dabei handelt es sich um das für uns geläufige System, eine Zahl durch mehrere aufeinander folgende Ziffern auszudrücken. Bei der Zahl 303 steht beispielsweise die erste 3 für »drei mal hundert« und die zweite 3 für »drei mal eins«. Ohne die Null zwischen beiden könnte man die Zahl nicht von der 33 unterscheiden, bei der die erste 3 für »drei mal zehn« steht.

Der älteste unumstrittene Beleg für die Verwendung der Null als Ziffer stammt aus dem Bakshali-Manuskript, einer Sammlung mathematischer Texte aus dem 3. Jahrhundert nach Christus, das in Pakistan gefunden wurde. Es dauerte jedoch 900 weitere Jahre, bis islamische Mathematiker die Null zusammen mit den indischen Zahlen nach Europa brachten. Viele europäische Gelehrte erachteten die Null aber nicht als sinnvoll; sie sahen sie nur als Zeichen und nicht als vollwertige Zahl an. Erst seit dem 17. Jahrhundert wird die Null in der Art und Weise verwendet, wie wir das heute tun.

Abgesehen davon, dass sich bestimmte Berechnungen ohne eine Zahl wie die Null überhaupt nicht durchführen lassen, ist sie vor allem entscheidend, um die Regeln so genannter algebraischer Strukturen aufzustellen. In der Algebra geht es darum, wie sich Mengen miteinander verknüpfen lassen. Dabei kann es sich um extrem komplexe Operationen handeln, aber auch um alltägliche Tätigkeiten wie die vier Grundrechenarten.

Will man zum Beispiel mathematisch exakt definieren, was es bedeutet, zwei Zahlen zu addieren, kommt man nicht ohne die Null aus. In diesem Zusammenhang bildet sie das so genannte neutrale Element, also die Zahl, die eine andere nicht verändert, wenn man beide summiert.

Die oben angegebene Formel geht noch eine Ebene tiefer und beschreibt das so genannte Leermengenaxiom, das aus der Zermelo-Fraenkel-Mengenlehre stammt. Diese bildet die Grundlage, auf der so gut wie alle Bereiche der modernen Mathematik fußen. Darin fordert man, dass es eine »leere Menge« gibt, die keine Elemente enthält, deren »Mächtigkeit« also gleich null ist.

Während es beliebig viele Mengen mit Mächtigkeit eins oder zwei gibt, hat bloß die leere Menge eine Mächtigkeit von null. Sie ist dadurch eindeutig bestimmt. Andererseits ist die Null nichts anderes als die Anzahl der Elemente der leeren Menge. Somit definieren sich beide Objekte gegenseitig.

Inzwischen ist die Null so tief in unser alltägliches Leben eingedrungen, dass man es sich ohne sie nicht mehr vorstellen kann: Sie ist definitiv mehr als nichts!



MARIUSZ BRAINARD / GETTY IMAGES / ISTOCK

Jan Haft
DIE WIESE
Lockruf in eine geheimnisvolle Welt
Penguin, München 2019
256 S., € 20,–



Der Bestand an artenreichen Wiesen ist in den zurückliegenden Jahrzehnten stark eingebrochen. Wesentlichen Anteil daran hat der großflächige Einsatz von Düngemitteln.

ÖKOLOGIE

VOM WERT DER WIESEN

Der Biologe und Naturfilmer Jan Haft legt in Wort und Bild dar, wie wichtig es ist, artenreiche Wiesen zu erhalten.

Wie überzeugt man seine Mitmenschen davon, dass die wenigen verbliebenen, extensiv genutzten Mähwiesen erhaltens- und schützenswert sind? Zumal, wenn es kaum noch Zeitgenoss(inn)en gibt, die persönliche Erlebnisse mit Wiesen verbinden oder gar den ökologischen Unterschied zwischen einer mageren Glatthaferwiese und einer gelb blühenden Löwenzahnwiese kennen? Der Biologe und Naturfilmer Jan Haft hat das Thema aufgearbeitet und sich dabei für eine sowohl emotionale als auch rationale Ansprache entschieden. Parallel zu diesem Buch hat er einen Film herausgebracht, der anrührende und spektakuläre Nah-, Zeitlupen- und Zeitrafferaufnahmen von Tieren und Pflanzen bietet. Der gedruckte Band präsentiert die detaillierten Sachinformationen dazu.

Es handelt sich dennoch nicht um ein nüchternes Fachbuch. Die Leidenschaft des Autors für Wiesen, die aus jedem Absatz spricht, rührt aus seiner Kindheit her. Haft möchte die Leser mit dieser Begeisterung anstecken und lässt sie unmittelbar teilhaben an Beobachtungen und Erkenntnissen. Das Buch beginnt und endet geradezu lyrisch, indem es im Prolog einen Frühlings- und im Epilog einen Herbstmorgen nach der ersten Frostnacht auf einer Wiese minuziös beschreibt. Dabei nimmt der Autor die Perspektive des Filmemachers ein, der die Eindrücke von Farben, Licht und Bewegungen mit der Kamera festhält. Wunderschöne Fotos auf 32 Bildtafeln unterstreichen dies.

In den acht Kapiteln dazwischen vermittelt der studierte Biologe leicht verständlich die botanisch-ökologischen Zusammenhänge, so dass auch interessierte Laien mühelos folgen können. Geschickt verknüpft er persönliche Erzählungen mit Sachinformationen und bemüht Zahlen und Statistiken nur, um die ökologische Bedeutung von Wiesen hervorzuheben. So berichtet er, ein Drittel aller heimischen Farn- und Blütenpflanzen kämen hauptsächlich auf Wiesen und Weiden vor, und 3500 heimische Tierarten seien an sie gebunden. Beispiele dafür sind Schnecken, die ausschließlich in Wiesen leben, oder Rehe, die zeitweise dort grasen oder ihre Kitze dort absetzen.

Laut Bundesamt für Naturschutz ist der Bestand an artenreichen Wiesen seit den 1950er Jahren um 98 Prozent eingebrochen; aktuell stehen ein Drittel der Wiesenpflanzen auf der Roten Liste. Daran anknüpfend erläutert der Autor plausibel und profund, wie das Flurbereinigungsgesetz (1953 in Kraft getreten), die Umstellung auf maschinelle Bearbeitung landwirtschaftlicher Flächen, der Einsatz von Kunstdünger und der Niedergang des Ökosystems Wiese miteinander zusammenhängen. Das Unwesen der Düngung, entweder direkt in Form von Kunstdünger oder Gülle oder indirekt über die Luft, greift Haft mehrfach auf und beleuchtet seine katastrophalen Auswirkungen auf das Ökosystem Wiese.

Um die Entstehungsgeschichte der Wiesen darzustellen, rollt der Autor die Erdgeschichte Europas auf. Er behandelt die wechselnden Vegetationsdecken des Kontinents – vom subtropischen Miozän über die Eiszeit bis zur Jetztzeit. Es folgen Exkurse in die Pflanzensoziologie, die Lehre der Pflanzengesellschaften, die sich Anfang des zurückliegenden Jahrtausends etablierte, und schließlich Ausführungen zu den verschiedenen Wiesentypen, die sich je nach Standort ausbilden können. Über die unterschiedlichen Verbreitungsstrategien von Wiesenpflanzen und ihr außerordentliches Erneuerungspotenzial, das sie mehrmaliges Mähen im Jahr ertragen lässt, kommt der Autor zu der spannenden Frage, ob sich Wiesenpflanzen tatsächlich erst mit Hilfe des Menschen vergesellschaftet haben. Er zweifelt das an und vertritt die bisher noch nicht belegte These, dass es sich um einen uralten Lebensraumtyp handeln müsse. Zur Begründung verweist der Autor auf die Großwildherden, die vor dem Auf-

treten der Menschen die Ebenen Europas durchzogen und durch ihr Fressverhalten sicherlich auch schon damals parkähnliche Landschaften geschaffen haben, ähnlich wie es heute in den artenreichen Hutewäldern zu beobachten ist.

Immer wieder streut Haft interessante Details zu einzelnen Pflanzen- oder Tierarten oder biologischen Sachverhalten ein, beispielsweise zum Dreiecksverhältnis zwischen dem Großen Wiesenknopf, dem Dunklen Wiesenknopf-Ameisenbläuling und der Knotenameise. Aber auch zum Verhalten der Schneckenhaus-Mauerbiene beim Einrichten und Tarnen ihrer Brutstätte oder zum Gesang von Heuschrecken, Zikaden und Wanzen. Dabei lässt er es nicht an Anekdoten fehlen, etwa über die Vorliebe Otto von Bismarcks für Kiebitzeier oder seine eigenen Erlebnisse mit der Ungarischen Wiesenotter bei einem Dreh in Ungarn.

Mit einem starken Plädoyer für den Erhalt der Wiesen und konkreten Vorschlägen hierzu beschließt Haft das Buch. Selbstverständlich, schreibt er, könnten in Städten, Gemeinden und Privatgärten diverse Biotope geschaffen werden – es sei aber letztlich eine großflächige, intakte Kulturlandschaft notwendig, um die am stärksten gefährdeten Arten wie den Großen Brachvogel zu bewahren. Haft macht sich deshalb für die Vermarktung der Biodiversität als Agrarprodukt stark. Es müsse sich für Landwirte lohnen, extensiv zu wirtschaften und auf Gewinnmaximierung zu verzichten, denn auch sie sollten von ihrer wichtigen Arbeit gut leben können. Den Einwand, dass Flächen für den Nahrungsanbau knapp seien und deshalb nicht weniger intensiv gewirtschaftet werden könne, kontert er mit dem Verweis auf jene 2,5 Millionen Hektar, die aktuell mit Energiepflanzen bestellt seien. Die gesamte EU-Agrarpolitik müsse revolutioniert werden, da ist sich Haft sicher. Das derzeitig praktizierte Zweisäulensystem, dessen ursprüngliche Idee es war, die Landwirtschaft in Europa ökologischer und nachhaltiger zu gestalten, sei wirkungslos geworden, nachdem es die mächtigen Bauernverbände unterhöhlt hätten.

Deutliche Worte, die von möglichst vielen Leser(innen) vernommen werden sollten.

Die Rezensentin Birgit Kanz ist Biologin, arbeitet als botanische Gutachterin für Planungsbüros in Naturschutz und Landschaftspflege sowie als freie Mitarbeiterin beim Forschungsinstitut Senckenberg.

MATHEMATIK
ANSCHAUEN, NACHDENKEN, AUSPROBIEREN

Die Mathematik bietet immer wieder neue und überraschende Aspekte, wie dieser Band überzeugend herausarbeitet.

Wer Gedankenexperimente liebt, mit Freude die Schönheit geometrischer Muster betrachtet oder sich einfach gern mit mathematischen Phänomenen beschäftigt, dem lässt sich dieses Buch empfehlen. Denn auch in seinem dritten Band über die Schönheit der Mathematik bietet Heinz Klaus Strick seinen Lesern unzählige Gelegenheiten zum »Anschauen, Nachdenken, Ausprobieren, Variieren, Recherchieren – Wundern«. Dass der Autor genau dieses Anliegen verfolgt, äußert er bereits im Vorwort. Es gelingt ihm rundum.

»Mathematik ist wunderwunderschön« präsentiert in zwölf Kapiteln, die thematisch weitgehend unabhängig voneinander sind, eine ausgewogene Mischung verschiedenster mathematischer Aspekte. Die Leser finden nicht nur eine Vielzahl geometrischer Betrachtungen vor, sondern bekommen auch ausgewählte Phänomene aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Zahlentheorie und Algebra geboten. Das Buch ist ansprechend illustriert; eine unglaubliche Fülle an Abbildungen dient dem Verdeutlichen der angesprochenen Inhalte, so dass schon der erste optische Eindruck Interesse weckt und man an vielen Stellen leicht »hängen bleibt«, um sich in die Materie zu vertiefen. Der Autor hat seine Auswahl an schöner Mathematik fachlich korrekt und mit großer Klarheit aufbereitet und dabei die üblichen Notationen gebraucht. Die Leser sollten also Variablen und mathematische Zeichen nicht zu ihren persönlichen Schreckgespenstern zählen, da übermäßige Angst den Blick auf die Schönheit verstellt.

In jedem Kapitel lassen sich neue spannende Entdeckungen machen. Besonders originell sind die hübschen kleinen Gedankenverrenker rund um die Teilbarkeitsregeln in Kapitel 5. Sicher gehört es nicht zu den alltäglichen Bedürfnissen, zu prüfen, ob eine Zahl wie 999 durch 37 teilbar ist – und dennoch bereitet es große Freude, diese Passagen zu lesen, die Knobelspielchen ähneln. Auch die Veranschaulichung der Binomialkoeffizienten über regelmäßige n-Ecke sticht hervor. Sie ist einprägsam und visualisiert einen Sachverhalt, den man üblicherweise eher rechnerisch nutzt. Weitere Highlights, die zum Mitdenken anregen, sind die Abschnitte über Fliesenmuster, magische Quadrate und Recontre-Probleme. In jedem Kapitel präsentiert der Autor zahlreiche »Anregungen zum Nachdenken und für eigene Untersuchungen« an – in Form kleinerer Aufgaben und Denkanstöße – und gibt am Ende stets Hinweise auf weiterführende Literatur.

Wer neugierig ist, gern neues Gedankenterrain erkundet und ein Faible für Mathematik hat, ist mit dem Werk gut beraten. Denn im Garten dieses Buchs kann sich – frei nach David Hilbert – jeder »nach seinem Geschmack einen Strauß pflücken«.

Heinz Klaus Strick
MATHEMATIK IST WUNDERWUNDERSCHÖN
Noch mehr Anregungen zum Anschauen und Erforschen für Menschen zwischen 9 und 99 Jahren
Springer, Berlin und Heidelberg 2019
338 S., € 17,99



Die Rezensentin Corinna Löhr ist Mathematik- und Deutschlehrerin in Montabaur und hat den MINT-Botschafterpreis 2011 erhalten.

ASTROBIOLOGIE

DER GROSSE FILTER

Die meisten Entwicklungssprünge des Lebens treten wohl mit hoher Wahrscheinlichkeit ein. Warum sehen wir dann keine Aliens?

Offenbar gibt es viele Himmelskörper, die potenziell bewohnbar sind. Mehr als 4000 Exoplaneten (Planeten außerhalb des Sonnensystems) sind bisher bekannt; viele von ihnen scheinen Gesteinsplaneten zu sein, auf deren Oberfläche flüssiges Wasser existieren kann. Geht man von dieser Stichprobe aus, könnten allein in der Milchstraße mehr als 30 Milliarden Sternsysteme bewohnbare Planeten haben. Selbst wenn nur jeder tausendste davon tatsächlich besiedelt wäre, ergäbe das dutzende Millionen belebte Welten.

Wieso bemerken wir dann nichts von Aliens? Damit befasst sich dieses Buch. Die Autoren postulieren: Wenn es dermaßen viele potenziell lebensfreundliche Himmelskörper gibt, aber nichts auf außerirdische Zivilisationen hindeutet, dann scheint es einen »großen Filter« zu geben, der technologisch fortgeschrittene Kulturen fast immer verhindert. Welcher von den vielen Entwicklungsschritten, die auf der Erde uns Menschen hervorgebracht haben, könnte dieser Filter sein? Das hinterfragen der Astrobiologe Dirk Schulze-Makuch von der TU Berlin und der Biochemiker William Bains vom MIT in Cambridge.

Schulze-Makuch und Bains erörtern, ob die großen Entwicklungssprünge des Lebens jeweils wahrscheinlich oder unwahrscheinlich waren. Dazu zählen sie: die Entstehung erster zellähnlicher Strukturen, die »Erfindung« der Fotosynthese, die ersten Eukaryoten, das Aufkommen der geschlechtlichen Fortpflanzung, die ersten Vielzeller, den Aufstieg komplexer Tiere und Pflanzen, die Entstehung der Intelligenz und schließlich der technologisch fortgeschrittenen Intelligenz. Für jeden dieser Übergänge betrachten die Autoren, ob es sich um einen »kritischen Weg« handelte (der Umbruch tritt ein, sobald seine Voraussetzungen erfüllt sind), um einen »Random Walk« (der Übergang erfolgt rein zufallsbedingt) oder um »viele Wege« (diverse Kombinationen aus zufälligen Ereignissen können den Wandel herbeiführen, was ihn sehr wahrscheinlich macht).

Die meisten großen Entwicklungssprünge ließen sich wohl auf vielerlei Weise realisieren, legen die Autoren dar. So sei die Fähigkeit, Sonnenlicht einzufangen und seine Energie zu nutzen, vermutlich viermal unabhängig voneinander entstanden. Und zwar auf der Grundlage so unterschiedlicher Verbindungen wie Chlorophyll, Rhodopsin, Melanin und Carotinoiden.

Dirk Schulze-Makuch, William Bains
DAS LEBENDIGE UNIVERSUM
Komplexes Leben auf vielen Planeten?
Springer, Berlin und Heidelberg 2019
277 S., € 24,99



Auch zu den Eukaryoten – jenen Lebewesen, deren Zellen einen echten Kern besitzen und räumlich stark untergliedert sind und zu denen auch wir Menschen gehören – führten offenkundig viele Wege. Sie gingen höchstwahrscheinlich aus Endosymbiosen hervor, also aus Lebensgemeinschaften, bei denen ein Organismus in den Zellen eines anderen überdauert. Wie die Autoren zeigen, tritt Endosymbiose in diversen Spielarten auf und ist weit verbreitet: Bakterien leben in anderen Bakterien oder auch in Zellen von Pilzen oder Tieren; Pilze leben in Pflanzenzellen; Archaeen nisten sich im Gewebe von Schwämmen ein und vieles mehr.

Aus solchen Betrachtungen schließen Schulze-Makuch und Bains, dass es sich bei fast allen wichtigen Entwicklungsschritten des Lebens um Viele-Wege-Prozesse handelte. Sie sollten deshalb auch auf anderen Himmelskörpern eintreten, sofern dort lange genug lebensfreundliche Bedingungen herrschen. Es gebe jedoch zwei markante Ausnahmen, betonen die Autoren. Die erste sei der Ursprung des Lebens selbst. Obwohl es gute Hypothesen dazu gibt, wissen wir letztlich weder, wo auf der Erde das Leben entstand, noch, ob es überhaupt auf der Erde entstand, noch, wie oft das geschah (möglicherweise mehrmals, wobei sich aber nur eine Form durchsetzte und den Vorläufer aller heutigen Organismen hervorbrachte). Solange das unklar sei, ließe sich nicht ausschließen, dass die Entstehung des Lebens ein höchst unwahrscheinliches Random-Walk-Ereignis ist.

Die zweite Ausnahme betrifft den Übergang zur technologisch fortgeschrittenen Intelligenz. Dazu kam es auf unserem Planeten bisher anscheinend nur einmal, und das erstaunt angesichts der großen Vielfalt der irdischen Organismen und der langen Zeit, in der die Evolution wirkte. Vielleicht, spekulieren die Autoren, liege der »große Filter« hier. Zum einen sei Intelligenz nicht immer von Vorteil – sie sei instinktiven Reflexen hinsichtlich Schnelligkeit und Zuverlässigkeit unterlegen, und sie erfordere komplexe Nervensysteme, die viele Ressourcen verschlängen. Der hohe Preis, der für Intelligenz zu zahlen sei, lohne sich nur, wenn generalisierbare Strategien gefragt sind, und das sei wohl seltener der Fall als zumeist angenommen.

Zum anderen sei denkbar, dass der »große Filter« noch vor uns liege, so Schulze-Makuch und Bains. Vielleicht existieren fortgeschrittene Zivilisationen nur für relativ kurze Zeit, beispielsweise weil sie ihre Ressourcengrundlagen rasch zerstören. In diesem Fall könnte es sein, dass sie zwar häufig entstehen, sich untereinander aber schlicht verpassen.

Das sparsam bebilderte Buch geht mit seinen rund 240 Seiten nicht sehr tief ins Detail, gibt aber einen Einblick in die Debatte und lässt sich Interessierten zur Einführung empfehlen. Naturwissenschaftliche Vorkenntnisse sind angeraten, da die Autoren wie selbstverständlich mit Begriffen wie »Hauptreihenstern« oder »Translation« operieren. Die Übersetzung aus dem

Englischen überzeugt nicht durchweg und wirkt bisweilen etwas erratisch. In jedem Kapitel listen die Autoren weiterführende Literatur auf; das Sachverzeichnis und das umfangreiche Glossar am Ende des Buchs erweisen sich als nützlich.

Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

GESCHICHTE
GEISEL DER POLITIK

Wie schon vor 500 Jahren Fake News in die Welt gesetzt wurden, um Menschen in Verruf zu bringen: die Geschichte der Papsttochter Lucrezia Borgia.

Wie wird man einer Frau gerecht, die ihre Bekanntheit vor allem ihrem schlechten Ruf verdankt? Lucrezia Borgia (1480-1519), uneheliche Tochter des machtbewussten Borgia-Papstes Alexander VI. und Schwester des skrupellosen Cesare Borgia, wird gemeinhin als verführerisch, zügellos und über Leichen gehend beschrieben. Was steckt hinter dem Bild der Femme fatale, die als Giftmischerin in die Geschichte einging und sogar mit ihrem Vater geschlafen haben soll? Entsprechen diese Behauptungen den historischen Fakten?

Die Münchner Historikerin und Italienkennerin Friederike Hausmann geht diesen Fragen in ihrer äußerst lesenswerten Biografie auf den Grund. Dabei überzeugt sie mit detektivischem Spürsinn, viel Einfühlungsvermögen und zeichnet ein sehr differenziertes Porträt Lucrezias und ihrer Zeit. Zwar gibt es Hausmann zufolge zahlreiche gesicherte Fakten über Lucrezia als Person, doch ist ihre Lebensgeschichte nur in einem größeren politischen Rahmen zu verstehen. Indem die Autorin Lucrezia in die Welt des frühneuzeitlichen Italien einbettet, gelingt es ihr, den Nebel um diese »unseligste Frauengestalt der modernen Geschichte« (Ferdinand Gregorovius) zu lichten und zur historischen belegbaren Person vorzustoßen. Für Hausmann steht fest: Alexandre Dumas und Victor Hugo haben zwar postum dazu beigetragen, die Papsttochter zu dämonisieren, doch ihr unvorteilhafter Ruf entstand bereits zu ihren Lebzeiten.

Kompetent zeigt die Autorin auf, wie politische Machtkämpfe, Intrigen und korrupte Machenschaften im Hause Borgia dem Image der Renaissancefürstin schadeten. Erst recht, da ihr Vater ein Papst war, der das Amt zur hemmungslosen Bereicherung seines Klans missbrauchte, Verwandte mit Kardinalshüten versorgte und die Borgias ebenso gekonnt wie skrupellos zu einer der mächtigsten Familien Europas machte. Wer in einem solchen familiären Umfeld aufwuchs und sozialisiert wurde, so Hausmann, sei unweigerlich – mitgefangen, mitgehangen – in kollektive Geiselhaft genommen worden.

Friederike Hausmann
LUCREZIA BORGIA
Glanz und Gewalt
Eine Biografie
C.H.Beck, München 2019
320 S., € 24,95



Seite um Seite entkräftet Hausmann das Zerrbild von der skandalumwitterten Papsttochter, indem sie auf Ungereimtheiten hinweist und hinterfragt, wer aus entsprechend verleumderischen Gerüchten hätte Nutzen ziehen können. So geht der Vorwurf des Inzests auf gekränkte männliche Eitelkeit zurück: Die Ehe mit Lucrezias erstem Ehemann, Giovanni Sforza, wurde wegen Impotenz geschieden. Und auch die Anwürfe hinsichtlich des sündhaften Lebens der Renaissancefürstin erweisen sich bei Licht besehen als Fake News, gestreut in der Absicht, dem Papst durch die Verleumdung seiner Tochter zu schaden. Bot doch das lasterhafte Leben des Borgia-Papstes genügend Stoff, um Lucrezia »als Projektionsfläche für Anschuldigungen aller Art« zu missbrauchen.

Hausmanns Buch belegt am Beispiel Lucrezias, unter welch erniedrigenden Umständen Frauen im Zeitalter der Renaissance lebten, in dem der weiblichen Selbstentfaltung enge Grenzen gesetzt waren. Lucrezia, mit 39 Jahren dreimal verheiratet und Mutter von acht Kindern, teilte das Los vieler Zeitgenossinnen, ihr Leben fremdbestimmt zu verbringen. Von den Vätern zwangsverheiratet, um die Macht der Familie zu mehren, und im Eheleben auf die Reproduktion bevorzugt männlichen Nachwuchses reduziert, waren die Handlungsspielräume der weiblichen Familienmitglieder weithin eingeschränkt.

Erst in ihrem zweiten Lebensabschnitt konnte sich Lucrezia als Herzogin von Ferrara stärker verwirklichen und zu einer eigenständigen Persönlichkeit heranwachsen. Hausmann gelingt es, Aspekte aus Lucrezias Leben ans Tageslicht zu bringen, die bislang wenig Beachtung fanden: ihr Engagement als Förderin der Künste und Wissenschaften, als umsichtige Unternehmerin und Mutter Teresa für Arme und Kranke. Als sie 1519 im Kindbett starb, war sie eine hochgeachtete Familien- und Landesmutter.

Wer verstehen will, wie Lucrezia Borgia zu der Figur werden konnte, als die sie noch heute dargestellt wird, sollte Hausmanns fundierte und anschaulich geschriebene Biografie zur Hand nehmen.

Der Rezensent Theodor Kissel ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.

CHEMIE
STOFFE MIT EINFLUSS

Sechs Geschichten erzählen, wie Kohlenstoff, Gummi oder Heroin die menschliche Gesellschaft geprägt haben.

»Stoffgeschichten« nennt der Autor Jens Soentgen seine Beiträge über weithin bekannte, brisante oder hoch relevante Molekülverbindungen. Mit ausgewählten konfliktbeladenen Substanzen beschäftigt er sich in

sechs Kapiteln: Kohlenstoffdioxid, Stickstoff, Nitrosprengstoffe (etwa Nitroglycerin oder TNT), Gummi, Heroin und Aspirin. Der Chemiker und Philosoph geht weniger auf deren chemische Details ein. Vielmehr möchte er darstellen, wie sich diese Chemikalien außerhalb der Labore auf unsere Kultur und unser Zusammenleben auswirken. Dabei ist ihm ein flüssig zu lesendes, unterhaltsames Werk gelungen, das man auch ohne chemische Kenntnisse verstehen kann.

Soentgen fragt, in welchen Kontexten und mit welchen Zielen die Stoffe erforscht wurden und welche Folgen sie für die Gesellschaft hatten. Oft findet er versteckte oder weniger bekannte Fakten. Es reizt ihn, Widersprüche in den Bildern aufzudecken, die sich die Öffentlichkeit von den jeweiligen Substanzen macht. Beispielsweise hinsichtlich des Stickstoffs: Der erhielt seinen wenig freundlichen Namen zwar auf Grund seiner erstickenden Wirkung, zeigt aber lebensspendende Eigenschaften in seiner Form als Nitrat – als Dünger für die Lebensmittelproduktion.

Ein weiteres Beispiel ist Heroin. Heute ist es als süchtig machende harte Droge bekannt, hatte aber nicht immer einen so schlechten Ruf. Es wurde fast zeitgleich mit Aspirin und vom selben Mitarbeiter der »Farbenfabriken vormals Friedrich Bayer und Co.« 1897 als Schmerzmittel hergestellt; das »-in« am Ende beider Stoffnamen war bei Medikamentenbezeichnungen gebräuchlich. Bayer vermarktete Heroin jahrzehntelang in großen Mengen als Husten- und Schmerzmittel – gerade in den verqualmten Industriestädten half es bei Lungenkrankheiten und allen Arten von Keuchhusten. Der Vorstandschef von Bayer sandte es mit besten Genesungswünschen an einen Kollegen, Mütter gaben es ihren Kindern. Erst als Heroin nicht mehr so stark nachgefragt wurde und die Produktion zurückging, »hatte [es] damit auch nicht mehr die mächtige deutsche Pharmaindustrie im Rücken« und wurde aus der klinischen Anwendung entfernt, verboten und kriminalisiert, schreibt Soentgen. Wobei es gerade bei schwersten Schmerzen, etwa bei unheilbar erkrankten Krebspatienten, rasch Linderung verschaffe und wenig Nebenwirkungen habe – abgesehen von der Abhängigkeit.

Zu den konfliktbeladenen Stoffen zählt der Autor auch Kohlenstoffdioxid, das schon den antiken Griechen und Römern Sorgen bereitete. Höhlen, in denen sich das Gas in tödlichen Konzentrationen ansammelte, sahen sie als Tore zur Unterwelt, wo man den Atem des Hades spüren könne. Doch die Menschen lernten dieses Gas zu nutzen, unter anderem als Zusatz für Sprudelwasser in der Getränkeindustrie, bis es als Treibhausgas wieder in Misskredit geriet. Es habe jedoch Nachteile, sich im Umweltschutz so sehr auf Kohlenstoffdioxid zu konzentrieren, meint Soentgen. Er führt zahlreiche gravierende Umweltprobleme an, die der Ausbau erneuerbarer Energie nach sich ziehe. Die »Dekarbonisierung« gehe in vielen Fällen zu Lasten der Natur, nicht immer würden Naturschutzziele beachtet. Zugleich beleuchtet er, wie so genannte Klimaskeptiker die Debatte für ihre Zwecke nutzen, und vergleicht deren publizistischen Kampf gegen die wissenschaftliche Empirie mit dem Streit um Darwins Evolutionstheorie.

Wer nach der Buchlektüre vertieft nachlesen will, findet in den Anmerkungen zahlreiche Quellenangaben. Der Anhang mit Anmerkungen, Quellen und Namensverzeichnis macht fast 25 Prozent des Werks aus.

Grundlegende wissenschaftliche Fragen, etwa wie Stoffe definiert werden oder wie die stoffgeschichtliche Methode in der Forschung aussieht, erläutert der Autor in der Einleitung und im Schlusskapitel. Diese eher theorielastigen Teile sind unter anderem aus Soentgens Habilitationsschrift hervorgegangen. Neuere Texte und Literatur hat er bis Mitte 2018 berücksichtigt.

Die Rezensentin Katja Maria Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

Jens Soentgen
KONFLIKTSTOFFE
Über Kohlendioxid, Heroin und andere strittige Substanzen
oekom, München 2019
288 S., € 24,–



Lewis Dartnell
URSPRÜNGE
Wie die Erde uns erschaffen hat
Aus dem Englischen von Thorsten Schmidt
Hanser, Berlin 2019
379 S., € 25,–



ERD- UND MENSCHHEITSGESCHICHTE
KINDER UNSERES PLANETEN

Der Astrobiologe Lewis Dartnell erklärt die Rolle von Klima, Landschaften und geologischer Dynamik in unserer Entwicklung.

Im Jahr 1994 wurde der Ort Sefidabeh im Iran vollständig durch ein Erdbeben zerstört. Die kleine Wüstenstadt liegt sehr abgelegen und ist die einzige Ortschaft im Umkreis von 100 Kilometern. Wieso traf die Katastrophe ausgerechnet diese Siedlung mit anscheinend höchster Präzision? Wie der Astrobiologe Lewis Dartnell in seinem äußerst lesenswerten Buch schreibt, ist die Ursache dafür im Untergrund zu suchen.

Tief in der Erdhülle entstehen durch Verwerfungen, die an der Oberfläche nicht sichtbar sind, gewaltige Spannungen, die sich im Fall von Sefidabehs zunächst als Segen und später als Fluch erwiesen. Sie machten eine Ansiedlung überhaupt erst möglich, weil das tektonische Geschehen nur an diesem Ort inmitten der Wüste dau-

erhaft Quellen speiste. Das Wasser lockte die Menschen an. Eben jene Spannungen führten dann aber auch in die Katastrophe, als sie sich in dem Erdbeben entluden.

Der traurige Fall von Sefidabeh ist einer von vielen, die Dartnell in seinem Werk behandelt. Fundiert legt er dar, wie untrennbar eng die Geschichte der Menschheit im Guten wie im Schlechten mit geologischen Vorgängen verbunden ist. Ob die Bewegung der Landmassen Gebirge in die Höhe schob, langfristig das Klima umkrempelte oder anderweitig das Gesicht der Erde veränderte: Immer reagierten die Menschen in ihrer Evolution, Ausbreitung und Kultur darauf.

»Wir sind Kinder der Plattentektonik«, resümiert Dartnell und spannt einen großen Bogen, beginnend mit der Geburt des Planeten. Obwohl er sich zuweilen in technischen Details verliert, skizziert er gekonnt die wesentlichen Entwicklungen und ihre gegenseitigen Verflechtungen, darunter die Plattentektonik, die Domestikation wichtiger Tier- und Pflanzenarten, die Bedeutung der Meere oder verschiedener Rohstoffe für den Menschen.

Der Autor fokussiert auf neuralgische Punkte der Menschheitsgeschichte – und präsentiert höchst originelle Thesen. Die Entstehung der ersten Demokratie im antiken Griechenland? Dazu habe sicher die zerklüftete Landschaft beigetragen, die alle selbstständigen Stadtstaaten voneinander getrennt hielt und verhinderte, dass einer davon die Vorherrschaft errang. »Als ein Ergebnis kam eine Welt vieler unabhängiger Stadtstaaten mit gemeinsamer Kultur und Sprache dabei heraus, die jedoch zugleich in einem sich fortwährend wandelnden Muster von Allianzen und Konflikten miteinander konkurrierten«, schreibt der Astrobiologe. Das unwegsame Gelände sei nicht geeignet gewesen für raumgreifende Schlachten mit Streitwagen oder Reiterei, daher habe in den griechischen Heeren häufig die Infanterie (etwa in Form der Hopliten) dominiert, zu der auch »gewöhnliche« Bürger Zugang hatten statt nur Angehörige einer elitären Kaste.

Wie eng wir mit geologischen Vorgängen verflochten sind, zeigt sich heute noch an vielen überraschenden Zusammenhängen. Dartnell verweist unter anderem auf den »Schwarzen Gürtel« in den USA. Das ist ein schmaler Grat, der sich im Südosten mitten durch ein Gebiet zieht, in dem die Partei der Republikaner bei Wahlen traditionell die Mehrheit erringt. Im »Black Belt« dagegen haben die politischen Gegner die Nase vorn – ein Muster, das sich laut Dartnell bis zum Bürgerkrieg zurückverfolgen lässt.

Wie kommt es dazu? Des Rätsels Lösung findet sich auch hier in der Dynamik des Erdsystems, denn der Grat besteht aus Ablagerungen, die ein längst verschwundenes Meer hinterlassen hat. Es ist besonders fruchtbarer Boden, auf dem vor allem Baumwolle angepflanzt wurde, eine außerordentlich arbeitsintensive Nutzpflanze. Ab dem 18. Jahrhundert wurden für eben diese Feldarbeiten in den Südstaaten schwarze Sklaven eingesetzt. Deren Nachfahren bilden mittlerweile die Mehrheit im »Black Belt«, dessen Name schon lange nicht mehr für den dunklen Boden, sondern für die jetzt dominierenden Bevölkerungsgruppen steht. Ein Umstand, der die Gegend nach dem Zweiten Weltkrieg zur Hochburg der Bürgerrechtsbewegung machte und heute der demokratischen Partei Mehrheiten verschafft. Es ist eine politische Präferenz, die auf dem viele Millionen Jahre alten Schlick eines vorzeitlichen Meeres basiert.

Die Rezensentin Susanne Wedlich ist Biologin und arbeitet als Wissenschaftsautorin in Münster.

LANDWIRTSCHAFT

TAUSEND ÄPFEL, ALLE VERSCHIEDEN

Das historische Werk eines hessischen Obstkundlers bezeugt, wie viele Sorten wir in den zurückliegenden Jahrzehnten verloren haben.

Richard Zorn
VERZEICHNIS ALLER IN DEUTSCHLAND ANGEBAUTEN KERNOBST-SORTEN
Kommentierte Erstveröffentlichung seines Hauptwerkes (1896–1944)
Herausgegeben von Ulrich Kaiser
Quelle & Meyer, Wiebelsheim 2019
720 S., € 99,–



So viele Äpfel, die alle gleich aussehen und sich doch in Nuancen unterscheiden! Wer durch die ersten 140 Seiten dieses kiloschweren Bands blättert, blickt auf rund 1000 Sorten, die der hessische Obstbauer und Obstbaukundler (»Pomologe«) Richard Zorn in den 1930er und 1940er Jahren detailgetreu gemalt und beschrieben hat. Jahrzehntelang lagerten die Bilder im Archiv, jetzt ist das Mammutwerk erstmals veröffentlicht worden.

Der erste Buchteil führt die Apfel- und einige Birnensorten nach Formen und Farben sortiert an – gegliedert etwa in großfruchtige, walzenförmige, rotschalige oder gestreifte. Im zweiten Teil hat Zorn auf knapp 500 Seiten die Äpfel eingehender charakterisiert und das Ganze alphabetisch geordnet. Man erfährt hier, dass sich der »Gelbe Gulderling« bis in den Mai hält, das Fruchtfleisch des »Großen Bohnapfels« grob und süßweinig ist und der »Nassauer Streifling« sich gut als Koch- und Weinapfel eignet. Manche Beschreibungen verwirren, weil der Name nicht verfängt und man nicht einordnen kann, ob es die jeweilige Sorte noch gibt und wie verbreitet sie ist. Hier wären ein paar zusätzliche Informationen nützlich gewesen.

Davon abgesehen ist es ein Verdienst des Verlags, mit der Publikation dieses Werks sehr viele verschollene Sorten dokumentiert zu haben. Dank der Veröffentlichung konnten einige in Hessen jetzt sogar wiederentdeckt werden. Praktischen Nutzen hat der Band vor allem für Pomologen und Regionalforscher. Alle anderen können in einer Formenfülle schwelgen, die schon lange aus dem Supermarkt verschwunden ist.

Der Rezensent Ralf Stork arbeitet als Naturjournalist und Buchautor; er lebt in Berlin.

LESERBRIEFE

ÜBERLEBEN BRAUCHT AKZEPTANZ

Die Archäologen Thomas Higham und Katerina Douka berichteten, wie sie kleinsten Knochenstücken Erkenntnisse über die Frühzeit des Menschen entlocken. (»Die Nadel im Knochenhaufen«, **Spektrum** Juli 2019, S. 34)

Karl Heinz Ranitzsch, Hamburg: Bei allen Artikeln, die ich über die Mischung von Genen von Neandertalern und Denisova mit modernen Menschen gelesen habe, vermisse ich einen wichtigen Aspekt: Dass sich Gene von Neandertalern und Denisova-Menschen bis in unsere Generationen erhalten haben, ist nicht nur eine biologische Frage.

Kleinkinder können bekanntlich allein nicht überleben. Die Kinder aus solchen Verbindungen wurden also bei den beteiligten Gruppen gut aufgenommen oder wenigstens so weit geduldet, dass sie gesund aufwachsen und selbst Kinder bekommen und heranziehen konnten. Das heißt, man kann auch gewisse Schlüsse über das soziale Verhalten in dieser Zeit ziehen.

MÜLLDEPONIEN ZUM KLIMASCHUTZ?

Die Menschheit muss in Zukunft große Mengen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen und einlagern – und dafür den optimalen Mix diverser technischer Ansätze finden. (»Das Klimagas vergraben«, **Spektrum** Juli 2019, S. 62)

Ulrich Karthäuser, Waldbröl: Kurz gefasst ist das Vergraben von CO_2 unbezahlbar. Die technischen Probleme sind auch nicht wenige. Wäre es nicht einfacher, gereinigte Kunststoffabfälle zu vergraben? Verbundwerkstoffe bieten da zusätzlich Potenzial. Die Müllverbrennung setzt CO_2 frei, das in Deponien gut gebunden sein könnte.

Peter Klamser, Egeln: Die Aufforstung ist das Gebot der Stunde. Sie macht aber nur Sinn, wenn die Bevölkerung lernt, mit diesem neuen Schatz nachhaltig umzugehen. Auch Biokohle ist ein hergebrachtes, genau bekanntes Verfahren. Die Kokereien, die konventionelle Kohle verarbeiteten, haben nicht nur Koks für die Stahlindustrie hergestellt, sondern ebenfalls eine breite Palette an chemischen Grundstoffen erzeugt, die zur Wertschöpfung entscheidend beigetragen haben. Warum sollte das bei Biokohle nicht der Fall sein? Bioenergie mit CO_2-Abscheidung hingegen ist relativ aufwändig, und sichere CO_2-Endlager sind schwierig zu finden. Wenn das Endlager undicht wird, war die ganze Mühe umsonst. Auch riesige Festgestein-Tagebaue zu errichten, um chemische Prozesse in der Natur zur Bindung von Kohlendioxid anzustoßen, ist unsinnig, da die negativen Umweltauswirkungen in allen Verarbeitungsschritten viel zu groß sind.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

SERIENNUMMERN AUF EUROSCHEINEN

Kolumnist Florian Freistetter stellte eine überraschende Eigenschaft des Querprodukts vor, das sich analog zur Quersumme aus den Ziffern einer Zahl bilden lässt. (»Beharrliche Berechnungen«, **Spektrum** Juli 2019, S. 71)

Peter Krbez, Graz: Etwas Ähnliches wie die erwähnte Querprüfsumme bei alten ISBN-Nummern findet sich meist unbemerkt täglich in unserem Alltag auf allen Eurobanknoten: Die Quersumme der Seriennummer jedes beliebigen Euroscheins ergibt bei den alten Scheinen immer 8, bei den neuen immer 7!

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Seriennummer Buchstaben enthält, denen man zuerst einen numerischen Wert zuweisen muss, der ihrer Stellung im Alphabet entspricht (also A = 1, B = 2, … , Z = 26). Bei alten Banknoten beginnt die Seriennummer mit einem, bei neuen mit zwei Buchstaben. Beispiel für einen neuen Schein: YA2798547416, das heißt 25 (Y) + 1 (A) + 2 + … + 6 = 79, davon die Quersumme ist 16, davon erneut die Quersumme ergibt 7. Probieren Sie es einfach selber aus, oder verblüffen Sie Ihre Freunde mit einem kleinen »Zaubertrick«!

BEGEISTERNDE VIELFALT

Die Themen des Augusthefts reichten von Quantengravitation über Dinosaurier, Gentherapie, die Venus, künstliche Intelligenz und Keltengold bis zur mathematischen Kunst. (**Spektrum** August 2019)

Hans-Peter Stricker, Berlin: Mein Abschied von **Spektrum** vollzog sich schleichend: die Themenvielfalt nahm ab, nach und nach kaufte ich das Heft immer seltener und zuletzt manchmal ein, zwei Jahre lang gar nicht.

Heute habe ich es mal wieder gewagt – und wurde belohnt! Alles, was ich früher an **Spektrum** liebte, fand ich wieder! Themen von Grundlagenphysik über Evolutionsbiologie bis zur Ästhetik der Mathematik – eigentlich alle – haben mich begeistert.

Ich weiß nicht, welches Wunder hier geschah, aber ich nahm es zur Kenntnis und bin sehr froh darum. Ich hoffe, es war kein Zufallstreffer.

Der neue Prometheus

Diesmal brachte er zu viel Feuer.
Eine Kurzgeschichte von Alex Shvartsman

Dass die erste Begegnung zwischen Mensch und Klln mit Gewalt und Tod endete, hätte ich als böses Vorzeichen erkennen sollen.

Nachdem ich weit entfernt von ihren größeren Ansiedlungen eine Bruchlandung hingelegt hatte, wollte ich rasch die nötigen Reparaturen ausführen und den Planeten verlassen, bevor ich der dominanten Lebensform begegnete, aber die Schäden waren schlimmer als erwartet. Also musste ich mich auf einen längeren Aufenthalt einrichten. Diese Welt war viel versprechend; es gab essbare Pflanzen, und das Wasser ließ sich nach einfacher chemischer Behandlung trinken. Ich war gerade auf Nahrungssuche, als ich angegriffen wurde.

Die attackierenden Klln waren ein Furcht erregender Anblick. Dutzende insektenähnlicher Wesen, jedes so groß wie ein Cockerspaniel, liefen auf mich zu. Ihre Zangen klapperten hastig. Die Geräusche, die sie ausstießen, glichen dem Kratzen von tausenden Fingernägeln auf einer Schultafel. Da ich nicht schnell genug zurück zum Schiff rennen konnte, schoss ich zweimal in die Luft und hoffte, der Lärm würde sie abschrecken. Leider nicht! Sie kamen näher. Ich geriet in Panik und feuerte in den Schwarm. Kugeln durchschlugen ihre Körper und töteten mehrere Angreifer. Unverhofft hielt der Schwarm endlich an. Sie untersuchten ihre Toten und zogen sich in sichere Entfernung zurück.

Danach sahen immer einige Klln von Weitem zu, wenn ich es wagte, das Schiff zu verlassen. Ich hatte Angst, beschloss aber, meine Arbeit fortzusetzen. Und eines Tages brachten mir die Klln eine Gabe. Zwei von ihnen näherten sich dem Absturzort, ganz langsam, als wollten sie mich gebührend vorwarnen. Sie trugen eine Hand voll der essbaren Pflanzen, bei deren Einsammeln sie mich früher beobachtet hatten. Die Klln legten ihr Geschenk vor die Luftschleuse und entfernten sich.

Das ging einige Zeit so weiter, bis ich den Mut fasste, sie zu besuchen. Als ich näher kam, schnatterten die Klln aufgeregt, wobei sie dasselbe Geräuschmuster immerfort wiederholten. Betroffen erkannte ich, dass es sich um eine echte Sprache handelte.

Mit Hilfe des Schiffscomputers war ich bald im Stande, mit den Insektenähnlichen zu kommunizieren. Ich erfuhr, dass sie sich Klln nannten. Ihre Spezies stand an der Schwelle zur Steinzeit: Sie lernten gerade den Gebrauch von Werkzeugen und entwickelten zügig ihre Sprache, indem sie neue Ideen aufnahmen und zu abstraktem Denken fähig wurden. Sie gewährten mir uneingeschränkten Zugang zu ihrer Siedlung und halfen mir, wo sie nur konnten, bei der Suche nach Rohmaterial für meine Reparaturarbeiten. Da konnte ich doch gar nicht anders, als mich zu revanchieren.

Ich machte Vorschläge, wie sie ihren Ackerbau verbessern konnten, und lehrte sie, mit Speeren zu jagen, die speziell für den festen Zugriff ihrer Zangen konstruiert waren. Und dann war da noch das Rad … Die Siedlung der Klln brauchte bloß Tage, um sich neue Technologien und Konzepte anzueignen, mit denen wir Menschen uns einst wohl viele Generationen lang herumgeschlagen hatten. Ich war stolz, einen kleinen Beitrag zu ihrer aufblühenden Zivilisation zu leisten. Würden sie sich noch nach Jahrtausenden vage an meinen Besuch erinnern? Waren einst auf ähnliche Weise die irdischen Sagen von Prometheus und Quetzlocoatl entstanden?

Ich war stolz, einen kleinen Beitrag zu ihrer Zivilisation zu leisten

Vier Monate später brach ein Krieg aus. Eine der größten Siedlungen, die ich vor der Landung beobachtet hatte, begann sich gewaltsam über diesen Teil des Kontinents auszudehnen. Hunderttausende Klln überfluteten das Umland und vernichteten die kleineren Ansiedlungen der Einheimischen. Doch da die hiesigen Klln gelernt hatten, mit Werkzeugen umzugehen, konnten sie trotz ihrer dramatischen Unterzahl erbitterten Widerstand leisten. Ich versteckte mich im Schiff und sah mittels Überwachungsdrohnen entsetzt zu, wie die Klln einander mit einer Bösartigkeit und Wildheit massakrierten, die alles übertraf, was ich je erlebt hatte.

Die Invasoren erlitten zwar schwere Verluste, passten sich aber sofort an die Taktik ihrer Gegner an. Sie hoben die Speere und Faustkeile der gefallenen Klln auf, und damit war der einzige Vorteil der Verteidiger dahin. Dennoch kämpften die Ansässigen bis zum letzten Krieger. In jeder Klln-Schlacht, deren Zeuge ich wurde, hatte das Leben des Einzelnen wenig Wert, und niemand trat jemals den Rückzug an. Es gab kein Pardon, und Gefangene wurden nicht gemacht. Binnen Stunden war die gesamte Siedlung, mit der ich mich angefreundet hatte, ausgelöscht.

Angesichts dessen fragte ich mich, wieso sich diese furchtlosen Kreaturen anfangs durch ein paar Pistolenschüsse abschrecken ließen. Ich begriff, dass mich nicht

Mehr Sciencefiction-Kurzgeschichten auf
spektrum.de/kurzgeschichte

ihre Furcht gerettet hatte, sondern ihre Neugier: Da ich Werkzeug und Wissen besaß, das ihnen fehlte, war ich ihnen nützlicher, wenn ich am Leben blieb. Dass sie sich solche Gedanken machen und in der Hitze des Gefechts danach handeln konnten, war ein weiterer Beweis ihrer bemerkenswerten Intelligenz.

Auch die Eroberer tolerierten meine Anwesenheit im Austausch für mehr Wissen – und ich, in unglaublicher Hybris blind vor Eitelkeit, verschaffte es ihnen. In nur zwei Jahren gelangten die Klln aus der Steinzeit ins Industriezeitalter. Sie perfektionierten die Metallverarbeitung und erfanden – ganz ohne mein Zutun – das Schießpulver. Wie ein an seinen Felsen geketteter Prometheus sah ich hilflos zu, wie die Zivilisation der Klln rund um mich wuchs und gedieh. Bei vorsichtiger Schätzung vermute ich, dass sie in weiteren 20 Jahren ihr erstes Raumschiff starten werden.

Nacht für Nacht wache ich schweißgebadet auf. In Angstträumen werden bösartige, methodische und superintelligente Käfer auf das Universum losgelassen – und schuld daran ist meine Einmischung. Lange bevor meine Warnsignale über viele Lichtjahre hinweg die nächsten menschlichen Kolonien erreichen können, werden die Klln ihre Heimatwelt verlassen haben. Ich war so verliebt in die Idee, für diese Spezies die spendable Gottheit zu spielen, dass ich damit möglicherweise die eigene Gattung ins Verderben stürze.

Aber es gibt noch eine Chance, die Katastrophe abzuwenden. Ich liefere den Klln weiterhin ausgewählte Proben menschlicher Wissenschaft, die ihr Interesse hoffentlich auf andere Forschungsgebiete lenken und sie vielleicht noch eine Weile davon abhalten, Flugtechniken zu entwickeln. In einigen Jahren werden sie fähig sein, chemische und biologische Waffen zu erzeugen – und damit, wenn ich Glück habe, die eigene Spezies ausrotten, bevor sie eine Methode ersinnen, den Planeten zu verlassen.

Mit diesem Ziel vor Augen wird der neue Prometheus bis dahin also fortfahren, seine Geschenke zu verteilen. ◂

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 566, S. 420, 21. Februar 2019

DER AUTOR

Alex Shvartsman lebt als Sciencefiction-Autor und Spieleentwickler in Brooklyn, New York. Seine Arbeiten stellt er unter www.alexshvartsman.com vor.



Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Verena Leusch (Volontärin), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich. Ansprechpartnerin: Anja Väterlein, E-Mail: anja.vaeterlein@iqm.de

Einem Teil dieser Heftausgabe liegt ein Prospekt der Firma RSD Reisedienst bei.

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1. 1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2019 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



Das Oktoberheft ist ab 21.9. 2019 im Handel.

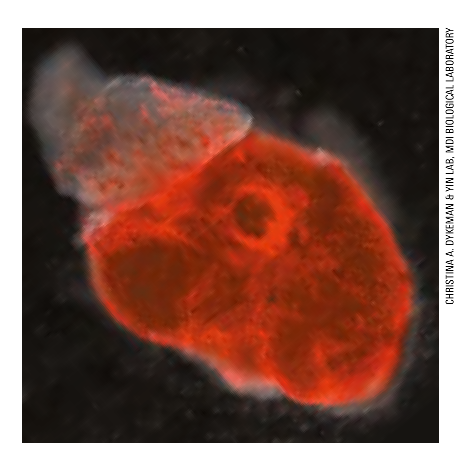
VORSCHAU



IDEAS_STUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

QUANTENWELT IM UNGLEICHGEWICHT

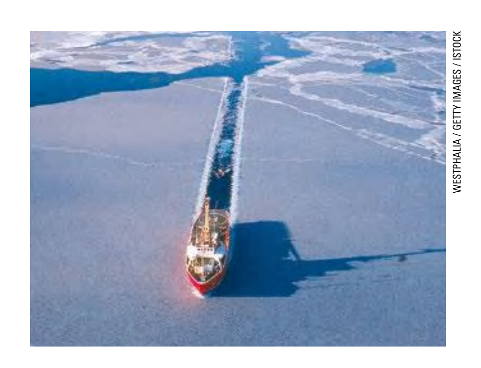
Fischschwärme, Stürme, Netzwerke, Galaxien: Fast nichts in unserer Welt ruht völlig im Gleichgewicht. Nun haben Forscher auch höchst unausgeglichene Quantensysteme im Labor untersucht. Dabei entdeckten sie, dass es offenbar übergreifende Gesetzmäßigkeiten gibt, denen unterschiedlichste Systeme folgen – vom jungen Universum bis hin zu ultrakalten Atomwolken.



CHRISTINA A. DYKEMAN & YIN LAB, MDI BIOLOGICAL LABORATORY

EIN JUNGBRUNNEN?

Das natürliche Antibiotikum MSI-1436 führt in Tierversuchen zu einer verblüffenden Regeneration beschädigter Organe. Am Menschen wurde es bislang als Mittel gegen Übergewicht und Diabetes getestet. Möglicherweise hilft es aber auch bei Herzinfarkt und Muskelschwund.



WESTPHALIA / GETTY IMAGES / ISTOCK

UMBRUCH IN DER ARKTIS

Die tauende Arktis weckt Begehrlichkeiten nach dort lagernden wertvollen Rohstoffen. Während manche Nation bereits Ansprüche auf den arktischen Meeresboden anmeldet, bricht eine beispiellose Expedition ins schwindende Eis auf, um ein Jahr lang zu erforschen, wie die Wetterküche der Erde das globale Klima bestimmt.



STRALSUND MUSEUM

GOLDSCHÄTZE DER WIKINGER

Könige der Nordmänner sollen treue Gefolgsleute mit Goldringen ausgezeichnet haben. Doch was Archäologen aus Kriegergräbern bergen, scheint die Überlieferungen nicht zu bestätigen.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!





ERSPARNIS:
12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,–), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:
Für nur € 6,–/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:
Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

App und PDF
als Kombipaket im Abo
Jetzt bestellen!

Spektrum der Wissenschaft
DIE WOCHE
NR 30
25.07. 2019
> Zwei Weiße Zwerge in der Todesspirale
> Doppelschlag gegen den invasiven Blutsauger
> Einzigartiges Wrack aus der Zeit von Christoph Kolumbus gefunden

TITELTHEMA: NEUROLOGIE
Männlicher Schmerz, weiblicher Schmerz
Lange gingen Wissenschaftler davon aus, dass Schmerzempfindungen bei Männern und Frauen auf die gleiche Weise entstehen. Doch das ist ein Irrtum.

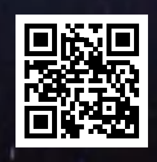
WIEDERAUFBAU VON NOTRE-DAME
Je extravaganter, desto besser

GESCHICHTE DER GUILLOTINE
Rasiermesser der Nation

INSEKTEN
Haarige Plage mit Gesundheitsgefahr

Mit ausgewählten Inhalten aus nature

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.



www.spektrum.de/abonnieren

UNSPLASH / KAZUEND (https://unsplash.com/photos/2KXEb_8G5vo)